



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ  
ÚSTAV ŽELEZNIČNÍCH KONSTRUKCÍ A STAVEB

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
INSTITUTE OF RAILWAY STRUCTURES AND CONSTRUCTIONS

# MĚŘENÍ DYNAMICKÝCH PARAMETRŮ SOUČÁSTÍ KOLEJOVÉHO ROŠTU

MEASUREMENT OF DYNAMIC PARAMETERS OF TRACK GRID

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

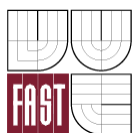
AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Adam Podolník

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

prof. Ing. JAROSLAV SMUTNÝ, Ph.D.

BRNO 2012



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

<b>Studijní program</b>	B3607 Stavební inženýrství
<b>Typ studijního programu</b>	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
<b>Studijní obor</b>	3647R013 Konstrukce a dopravní stavby
<b>Pracoviště</b>	Ústav železničních konstrukcí a staveb

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>Student</b>	Adam Podolník
<b>Název</b>	Měření dynamických parametrů součástí kolejového roštu
<b>Vedoucí bakalářské práce</b>	prof. Ing. Jaroslav Smutný, Ph.D.
<b>Datum zadání bakalářské práce</b>	30. 11. 2011
<b>Datum odevzdání bakalářské práce</b>	25. 5. 2012
V Brně dne 30. 11. 2011	

.....  
doc. Ing. Otto Plášek, Ph.D.  
Vedoucí ústavu

.....  
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.  
Děkan Fakulty stavební VUT

## **Podklady a literatura**

- 1) Předpis SŽDC S3 Železniční svršek. 2008. TÚDC – Oddělení typové dokumentace. Olomouc.
- 2) MILÁČEK S.: Měření a vyhodnocování mechanických veličin. ČVUT Praha. 2001. ISBN 80 01 02417 2.
- 4) SMUTNÝ J., PAZDERA L.: Železniční stavby. Měřicí technika a dynamika železničních staveb. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 1998. 69 s. ISBN 80-214-0976-2
- 5) Kotek J.: Měření a analýza dynamicko-akustických parametrů kolejnicových upevnění. Diplomová práce. 203. 104 s. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav železničních konstrukcí a staveb.
- 6) PŘEROVSKÝ O.: Analýza dynamických parametrů kolejnicových upevnění. Bakalářská práce. Brno. 2010. 38 s., 70 s. příl. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav železničních konstrukcí a staveb.

## **Zásady pro vypracování**

Podkladem pro výběr a srovnání zejména nových částí kolejového svršku jsou kromě teoretické analýzy, také statické a dynamické zkoušky prováděné v laboratoři i v terénu. Nutno podotknout, že teoretická analýza aplikací matematického modelování často vychází ze značně zidealizovaných předpokladů. Náplní bakalářské práce bude experimentální analýza dynamických účinků vybraných konstrukcí pružného bezpodkladnicového upevnění kolejnic. Účinky vlakové dopravy budou simulovány na speciálně upravených vzorcích pomocí inerciálního budiče. Bude provedeno také doplňkové měření dynamické odezvy konstrukcí na ráz vyvolaný modálním kladivem. Měření budou uskutečněna ve vhodných prostorách areálu VUT FAST.

## **Předepsané přílohy**

Licenční smlouva o zveřejňování vysokoškolských kvalifikačních prací  
Rozbor současného stavu dané problematiky  
Úvod do problému  
Návrh, popis a zdůvodnění metodiky měření  
Analýza dat v časové oblasti  
Analýza dat ve frekvenční oblasti  
Srovnání jednotlivých variant měření  
Závěry a doporučení

.....  
prof. Ing. Jaroslav Smutný, Ph.D.  
Vedoucí bakalářské práce

## **Abstrakt**

Podkladem pro výběr a srovnání zejména nových částí kolejového svršku jsou kromě teoretické analýzy, také statické a dynamické zkoušky prováděné v laboratoři i v terénu. Nutno podotknout, že teoretická analýza aplikací matematického modelování často vychází ze značně zidealizovaných předpokladů. Náplní bakalářské práce je experimentální analýza dynamických účinků vybraných konstrukcí pružného bezpodkladnicového upevnění kolejnic. Účinky vlakové dopravy byly simulovány na speciálně upravených vzorcích pomocí inerciálního budiče. Bylo provedeno také doplňkové měření dynamické odezvy konstrukcí na ráz vyvolaný modálním kladivem. Měření byla uskutečněna v prostorách laboratoří ÚPKO a ÚŽKS a v terénu.

## **Klíčová slova**

Kolejový rošt, kolejnice, pražec, kolejové lože, vibrace, tlumení, frekvenční analýza

## **Abstract**

Coupled with theory analyses, various static and dynamic tests carrying out in laboratory or directly on site serve as a basis for selection and comparison of particular rail superstructure parts. It should be noted that the theoretical analysis of the application of mathematical modeling is often based on highly idealized assumptions. The purpose of this bachelor thesis is the experimental analysis of dynamic effects of selected flexible fastening structures without baseplates. Forces induced by the passage of trains have been simulated on a specially prepared samples using inertial exciter. Additional measurements of the dynamic response of structures to shock induced by a modal hammer were also performed. Measurements were performed in the laboratory of ÚPKO and ÚŽKS and in situ.

## **Keywords**

Track grid, rail, sleeper, ballast layer, vibration, damping, frequency analysis



### **Bibliografická citace VŠKP**

PODOLNÍK, Adam. *Měření dynamických parametrů součástí kolejového roštu*. Brno, 2012. 56 s., 53 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav železničních konstrukcí a staveb. Vedoucí práce prof. Ing. Jaroslav Smutný, Ph.D..

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval(a) samostatně, a že jsem uvedl(a) všechny použité, informační zdroje.

V Brně dne 25.5.2012

.....  
podpis autora

# PODĚKOVÁNÍ

Mé poděkování patří všem, kteří se podíleli na vzniku této bakalářské práce, ať už pomocí při přípravě místa pro měření nebo při měření samotném, poskytnutím potřebné literatury nebo radou. Jmenovitě se jedná o Ing. Ivana Vukušiče.

Speciálně bych chtěl poděkovat mému vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Jaroslavu Smutnému, Ph.D., který mi svým přátelským přístupem a nezbytnými odbornými znalostmi pomohl k zvládnutí této bakalářské práce a nese tak zásadní podíl na jejím zdárném dokončení.

„Děkuji.“

Autor

# OBSAH

1 ÚVOD.....	3
2 TEORIE.....	5
2.1 KOLEJOVÝ ROŠT.....	5
2.1.1 KOLEJNICE.....	5
2.1.2 UPEVNĚNOVADLA.....	6
2.1.3 KOLEJNICOVÉ PODPORY.....	7
2.1.4 KOLEJOVÉ LOŽE.....	9
2.2 DYNAMICKÉ PARAMETRY.....	9
2.2.1 BUZENÍ RÁZEM.....	10
2.2.2 BUZENÍ INERCIÁLNÍM BUDIČEM.....	11
2.2.3 TYPY BUDÍCÍCH SIGNÁLŮ.....	11
2.2.4 ÚTLUM.....	12
2.2.5 PŘENOSOVÉ FUNKCE.....	13
2.2.6 FOURIEROVA TRANSFORMACE.....	15
3 MĚŘENÍ.....	16
3.1 MĚŘENÍ VIBRACÍ.....	16
3.2 ZKOUŠENÉ VZORKY.....	16
3.2.1 PRAŽEC B 91 P A UPEVNĚNÍ PANDROL FC I.....	17
3.2.2 PRAŽEC B 91S/1 A UPEVNĚNÍ VOSSLOH W 14.....	18
3.2.3 PRAŽEC B 91S/1 A UPEVNĚNÍ VOSSLOH W 14NT.....	19
3.2.4 PRAŽEC B 91S/1 A UPEVNĚNÍ VOSSLOH W 21.....	20
3.2.5 PRAŽEC B 91S/1 A UPEVNĚNÍ VOSSLOH E 14.....	21
3.3 USPOŘÁDÁNÍ ZKOUŠKY.....	22
3.3.1 POPIS SOUČÁSTÍ APARATURY.....	22
3.3.2 POPIS ZAPOJENÍ A FUNKCE APARATURY.....	22
3.3.3 POPIS USPOŘÁDÁNÍ ZKOUŠKY.....	23
3.4 PRŮBĚH MĚŘENÍ.....	26
3.4.1 BUZENÍ RÁZOVÝM KLADIVEM.....	26
3.4.2 BUZENÍ ELEKTRODYNAMICKÝM BUDIČEM.....	28
3.4.3 MĚŘENÍ V TERÉNU.....	29

4 VYHODNOCENÍ.....	30
4.1 VYHODNOCENÍ VIBRACÍ.....	30
4.1.1 VYHODNOCENÍ V ČASOVÉ OBLASTI.....	30
4.1.1 VYHODNOCENÍ VE FREKVENČNÍ OBLASTI.....	31
4.1.2.1 SROVNÁNÍ ZPŮSOBŮ BUZENÍ .....	31
4.1.2.1 SROVNÁNÍ UPEVNĚNÍ PANDROL FC I	
A VOSSLOH .....	35
4.1.2.1 SROVNÁNÍ UPEVNĚNÍ VOSSLOH W 14	
NOVÉ A STARÉ.....	37
4.1.2.1 SROVNÁNÍ MĚŘENÍ V LABORATOŘI A V	
TERÉNU.....	38
4.1.2.1 VLIV STAVU DOTAŽENÍ .....	40
4.1.1 VYHODNOCENÍ TLUMENÍ.....	40
5. ZÁVĚR.....	53
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	55
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ.....	56
PŘÍLOHY	

# 1 ÚVOD

Vibrace jsou součástí našeho každodenního života. Vibrace na některých frekvencích mohou být dokonce nebezpečné z hygienického hlediska. Mohou poškozovat naše orgány a celkově nepříznivě ovlivnit chod našeho těla. Ale nejedná se jen o nás, ovlivňují i chod přírody jako takové. Tedy i z tohoto hlediska plyne potřeba snižovat vibrace, které nejsou vyvozovány účelně, a zajistit tak přirozenější prostředí pro život.

Svůj podíl na rozvoji a šíření vibrací má také železniční doprava, která svými dynamickými účinky vede k rozvoji vibrací v oblasti kolejového roštu. Kolejový rošt, respektive upevnění kolejnice na pražec, se tak stává prvním krokem při přenosu zatížení a tedy i jeho dynamických účinků. Přínos kolejového roštu, jehož značné zdokonalení za mnoho let vývoje v oblasti snižování vibrací, je znatelné. Vývoj přinesl velké množství různých typů upevnění, které se ovšem liší svým provedením a z toho plynoucími vlastnostmi v oblasti přenosu dynamických účinků zatížení. Stále je ale možný prostor k vývoji. Ať už použitím nových materiálů, nových typů upevnění, různých druhů podložek pod kolejnice, nebo použitím experimentálních řešení.

Nahlédneme-li na aspekty úrovně vibrací na kolejovém roštu, dojdeme k těmto hlavním zdrojům. Prvním je rychlost a snaha o její neustálé zvyšování, což jde ruku v ruce se zvyšováním počtu vlaků projíždějících po koleji za časový úsek. Dalším aspektem je jedna z funkcí kolejového roštu, a to zajištění výškových a směrových parametrů trati a z něho plynoucí vznik bočních rázů podílejících se taktéž na vzniku vibrací. Nemalou měrou se na úrovni vibrací podílí také skladba železničního svršku a spodku.

Jednou z metod používanou pro měření úrovně vibrací v terénu i laboratorních podmínkách je měření pomocí budícího kladiva. V této práci se zaměřím na možnosti měření vibrací od projíždějících souprav v laboratorních podmínkách pomocí alternativního buzení a jeho případného srovnání s měřením na podobné konstrukci v terénu. Pro řešení této práce byly vybrány metody buzení speciálním kladivem a buzení elektrodynamickým budičem. Metoda měření vibrací pomocí elektrodynamického budiče nebývá běžně používána, bude tedy dobré ji srovnat s konvenční metodou budícího kladiva.

V této práci se zaměřím na hodnocení dynamických parametrů různých kombinací kolejového roštu tvořeného:

- pražcem B 91P a upevněním Pandrol FC I;
- pražcem B 91S/1 a upevněním Vossloh W 14;
- pražcem B 91S/1 a upevněním Vossloh W 14 (s novými komponenty);
- pražcem B 91S/1 a upevněním Vossloh W 14NT;
- pražcem B 91S/1 a upevněním Vossloh W 21;
- pražcem B 91S/1 a upevněním Vossloh E 14.

Upevnění Vossloh W14 bylo zvoleno jakožto jeden z nejpoužívanějších typů upevnění, z tohoto důvodu u něj bylo uskutečněno také doplňkové měření při použití nových komponentů. Dalším zvoleným typem upevnění bylo upevnění W 14NT, které je poměrně nové a tedy vhodné pro zkoumání. Upevnění Vossloh W 21 je taktéž nové upevnění a je dobým objektem výzkumu. Posledním bylo upevnění Vossloh E 14 speciálně navržené pro zvýšení pružnosti, tomu je také upravena konstrukce. Bylo tedy vhodné pro porovnání s ostatními upevněními Vossloh běžné konstrukce. Upevnění Pandrol FC I pak slouží pro srovnání s upevněním jiného typu.

U upevnění Vossloh budou provedena měření jak při předpisovém dotažení, tak při nedotaženém stavu a přetaženém stavu. Součástí vyhodnocení tedy bude nejen srovnání jednotlivých upevnění jako takových, ale i hodnocení, zdali má kvalita montáže vliv na šíření vibrací kolejovým roštem. Naopak také jestli je poznat, že bylo provedeno měření na daném úrovní dotažení nebo ne. Výsledkem práce by měla být analýza dat v časové a frekvenční oblasti a srovnání jednotlivých variant měření a srovnání hodnot tlumení těchto jednotlivých variant.

## 2 TEORIE

V teoretické části své práce zmíním základní pojmy týkající se dynamických parametrů součástí kolejového roštu.

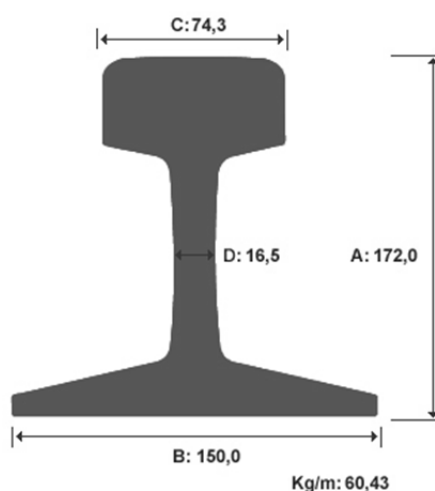
### 2.1 KOLEJOVÝ ROŠT

Kolejový rošt je součástí železničního svršku, který se skládá právě z kolejového roštu a kolejového lože. Samotný kolejový rošt je tvořen kolejnicemi, upevňovacími a podporami.

#### 2.1.1 Kolejnice

Kolejnice zabezpečují vedení železničních vozidel a přenos zatížení na podpory. Jsou nejvíce namáhanou součástí koleje, přicházející do přímého styku s dvojkolím vozidel. Tato dvojkolí jim předávají na velice malých styčných plochách velké statické tlaky a dynamické rázy, jejichž směr, velikost a charakter se bez přestání mění. Dále plní funkci zpětného vedení na elektrizovaných tratích a je součástí kolejových obvodů zabezpečovacích zařízení.

Koleje dělíme podle stykování na dvě skupiny a to stykované a bezstykové. U stykovaných nevzniká v koleji napětí, je jim umožněna volná dilatace. Naproti tomu u bezstykové koleje, která je ve stycích svařena, vzniká napětí od teplotních změn.



*Obr. 2.1 Řez kolejnicí UIC60*



Na našich tratích se setkáváme se širokopatními kolejnicemi tvaru T, S49, R65 a UIC60. Poslední typ se klade na modernizované tratě a bude také předmětem zkoumání mé práce. Tyto typy kolejnic jsou charakterizovány zejména svými rozměry a hmotností na metr běžný (viz. Obr. 2.1).

### **2.1.2 Upevňovadla**

Kolejnice jsou upevněny k pražcům přímo, nepřímo nebo kombinací. U přímého je kolejnice přímo nebo s podkladnicí upevněna k podkladu společnými upevňovadly. U nepřímého je kolejnice k podkladnici upevněna jedním druhem a podkladnice k podkladu druhým.

Ve své práci se budu zabývat pouze upevněními typu Vossloh a Pandrol. Oba tyto druhy upevnění používají pružné svěrky zajišťující stálou přitlačnou sílu. Je dostatečně zaručena držečnost uzlu upevnění a podélný odpor proti posunutí kolejnice, a to i při vibracích kolejnice v uzlu upevnění.

#### **Vossloh**

Toto upevnění používá k montáži svěrek u bezpodkladnicového upevnění vrtulí, u podkladnicového upevnění svěrkových šroubů. Výhodou je snadná regenerace betonových pražců.

Pružná svěrka systému Vossloh má pro podkladnicové upevnění označení Skl 24 (dříve Skl 12, z důvodu praskání vyměněny za Skl 24), pro bezpodkladnicové Skl 14. Kolejnice je směrově vedena boční úhlovou vložkou. U bezpodkladnicového upevnění je možná změna rozchodu výměnou plastových vložek. Nominální svěrná síla upevnění typu Vossloh je 10 kN při zdvihu svěrky 13 mm. Volná ramena přitlačují patu kolejnice.

#### **Pandrol**

Pro montáž tohoto typu upevnění u bezpodkladnicového upevnění se používá pražcové kotvy a u podkladnicového adaptéry.

Bezpodkladnicové upevnění typu Pandrol má označení FastClip. Je charakteristické

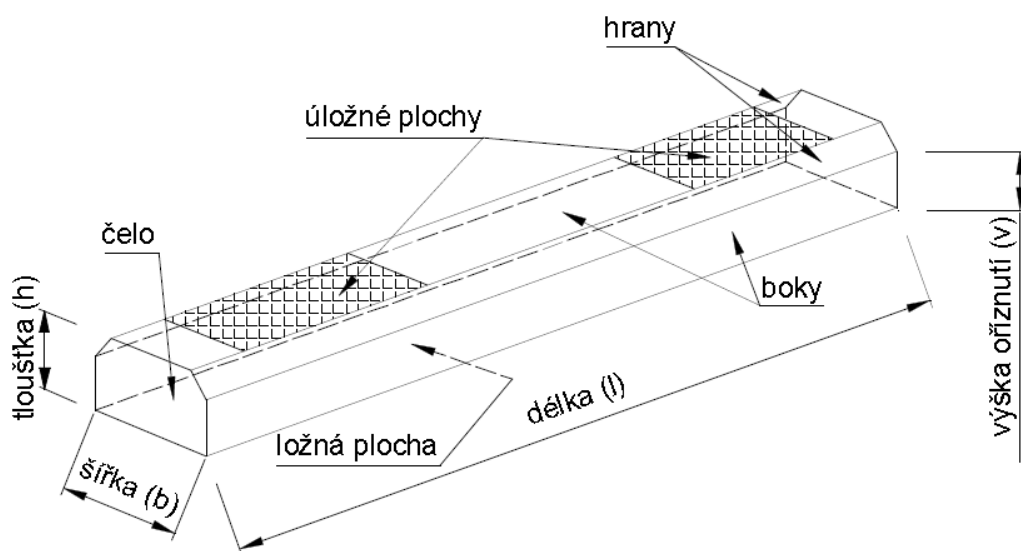
použitím pružných spon, které se do pracovní polohy nasunou ve směru kolmo na osu kolejnice, při mezeře mezi pražcem a patou kolejnice větší než 6 mm je nutné přizvednutí pražce. Na pracovní nos spony se navléká plastový izolátor. Spona je k pražci uchycena v pražcové kotvě a je opatřena bočními plastovými vložkami, které vymezují polohu kolejnice v uzlu upevnění. Kolejnice je uložena na pryžové podložce.

Pro podkladnicové upevnění se u SŽDC používá upevnění Pandrol „e“. Adaptér se vkládá do výřezu žebra žebrové podkladnice. Ovšem nevýhodou tohoto řešení je nemožnost předmontáže svěrek na pražce. Výhodou je snadná montáž a nízké nároky na údržbu.

### 2.1.3 Kolejnicové podpory

Všechny druhy podepření kolejnic se souhrnně nazývají kolejnicové podpory. Ve své práci bych se rád zaměřil pouze na příčné železniční pražce, jelikož budou součástí mého pokusu.

Pro lepší porozumění nejdříve popíšu skladbu pražce. Skládá se z úložné plochy, ložné plochy, čela pražce a jeho boků. Nejlépe je to vidět na obrázku (Obr. 2.2).



Obr. 2.2 Skladba pražce

Příčné železniční pražce zajišťují stálost rozchodu koleje a roznášení účinku zatížení (svislého nebo vodorovného, jak podélného tak příčného) od pohybujících se vozidlem do pražcového podloží. Tento roznos je realizován kontaktem s kolejnicí přes úložnou plochu pražce (horní část) na ložnou plochu pražce (dolní část). Vzhledem k opakovanému zatížení je velice obtížné správně podepřít pražce, tak aby byl umožněn předpokládaný roznos sil.

Opakované zatěžování má za důsledek přesun působíště ke středu pražce. Změna polohy pražce nastává zároveň se změnou převýšení a rozchodu koleje. Další z funkcí příčných pražců je dostatečné elektrické oddělení obou kolejnicových pásů. Významnou funkci má také zajištění příčného odporu, toho je dosaženo zaštěrkováním v oblasti za hlavami pražců, tak aby nevznikaly mezery mezi čely pražců a kolejovým ložem. Vzdálenost pražců je dána takzvaným rozdělením pražců. Z pohledu užitého materiálu se pražce člení na dřevěné (u nás borové, modřínové, bukové a dubové), ocelové, betonové (železobetonové nebo z předpjatého betonu) a pražce z ostatních materiálů (plastové a jiné experimentální pražce). Dnes jsou nejpoužívanější pražce betonové SB8 a B 91S (typ B 91S bude použit při pokusu). Jinými druhy podpor z hlediska tvaru mohou být například betonové bloky, deskové pražce, podélné prahy nebo monolitická betonová deska.

## **Betonové pražce**

Betonové pražce se z hlediska vyztužení dělí na pražce ze železobetonu a předpjatého betonu (jak předem tak toho dodatečně předpjatého). Nejrozšířenější jsou přitom pražce z předpjatého betonu. Dále je dělíme monoblokové a dvoublokové typy pražců. V současné době se u SŽDC používají hlavně monoblokové pražce.

Výhodami betonových pražců jsou mimo jiné vysoká hmotnost (200 – 300 kg), důležitá pro stabilitu bezстыkové koleje a životnost daná dobrou držebností upevňovadel. Další nespornou výhodou je relativně snadná výroba.

Oproti tomu nevýhodou betonových pražců je jejich značná tuhost oproti pražcům dřevěným, která ve spojení se špatným stavem kolejového lože může vyústit v takzvané pumpování pražců. Také ve zvýšené míře přenáší vibrace způsobené nepravidelnostmi jízdní dráhy. Betonové pražce jsou náchylné k poškození nárazem (např. vykolejením vozidla nebo při podbíjení).

Pražce s označením B 91S, tedy pražce z předpjatého betonu, které budou součástí mého pokusu jsou vyráběny pro kombinace upevnění Vossloh i Pandrol s kolejnicí UIC 60. Proto byly zvoleny pro tuto práci.

## 2.1.4 Kolejové lože

Kolejové lože má stejně jako zařízení na něm za úkol roznést zatížení, tentokrát do železničního spodku a zajišťuje pružné uložení tohoto zařízení, tedy kolejového roštu. Zajišťuje odpor proti příčnému a podélnému posunutí koleje a umožňuje tak směrové a výškové vedení koleje.

Mezi základní parametry kolejového lože patří tloušťka kolejového lože, měřená mezi plání tělesa železničního spodku a ložnou plochou kolejnicové podpory pod nepřevýšeným kolejnicovým pásem, a jeho profil. Neméně důležité jsou také geotechnické vlastnosti použitého kameniva. Kolejové lože musí být propustné a nenamrzavé, pružné a stabilní. Tam kde je to potřeba, musí zajistit dostatečnou vzájemnou elektrickou izolaci kolejnicových pásů.

Materiál kolejového lože musí splňovat podmínky, zahrnující pevnost kameniva, jeho dostatečnou odolnost proti účinkům mrazu a vhodné chemické složení. Kamenivo musí být ostrohranné a splňovat nároky na tvarový index., tak aby došlo k zaklínění zrn materiálu kolejového lože. Pro koleje SŽDC se používá kamenivo frakce 31,5/63. Pro zachování vlastností kolejového lože je důležitá již zmíněná propustnost. Při zanešení kolejového lože nečistotami dohází ke snížení únosnosti a odporů kolejového lože.

## 2.2 DYNAMICKÉ PARAMETRY

Vlivem zvyšování celkové tuhosti konstrukce (betonové pražce, pevná jízdní dráha apod.), za účelem zvýšení rychlosti na koridorových a ostatních hlavních tratích, vzniká větší množství dynamických vzájemných působení mezi kolem a kolejnicí. Tyto interakce při nedostatečných pružných a tlumících vazbách mezi kolejnicí a pražcem, nepříznivě ovlivňují nejen vozidlo, ale také konstrukci svršku a spodku a geometrické parametry koleje.

Takto vzniklé dynamické účinky na styku kola a kolejnice jsou přenášeny takzvaným primárním a sekundárním vypružením. Primární vypružení zastupuje konstrukce upevnění kolejnice a to pružné podložky a svěrky nebo pryžová podložka umístěná pod patou kolejnice. Sekundární vypružení zahrnuje kolejové lože, které dokáže utlumit hlavně nižší frekvence. Z důvodů tlumení je tedy důležité umístění pružných upevnění.

Při převodu jedné libovolné fyzikální veličiny na druhou, nejčastěji elektrickou je pro převodník důležité znát statické a dynamické charakteristiky.

### 2.2.1 Buzení rázem

Rázové buzení pomocí kladívka je velmi pohodlný způsob buzení. Rozsah frekvencí, který je účinně vybuzen, je dán tuhostí dotýkajících se povrchů a hmotností hlavy kladívka. Když hrot kladívka udeří do testované struktury, vyvolá silový impuls. Impuls tohoto typu má frekvenční obsah, který je až do určité frekvence v podstatě plochý a nad ní je slabší. Je možné dokázat, že k tomu, abychom zvýšili frekvenční rozsah, je zapotřebí zkrátit délku pulsu. Ta má zase vztah k tuhosti (ne k tvrdosti) zúčastněných povrchů a k hmotnosti hlavy kladívka. Čím jsou materiály tužší, tím kratší je délka trvání pulsu a tím vyšší je frekvenční rozsah vybuzený úderem. Podobně, čím menší je hmotnost kladívka, tím vyšší je účinný frekvenční rozsah. Za tím účelem, aby bylo možné regulovat použitelný frekvenční rozsah, se používá na kladívko sada různých hrotů a hlav. Obecně lze říci, že se má použít nejměkčí možný hrot, aby veškerá vstupní energie byla dodána ve frekvenčním pásmu, které nás zajímá: použití tužšího hrotu než je nutné vede k tomu, že dodaná energie způsobí vibrace vně frekvenčního pásma, které nás zajímá, na úkor těch, které jsou uvnitř tohoto pásma.

Při buzení pomocí rázového kladiva je nutné dodržovat stále stejné místo buzení a jeho orientaci vzhledem k normálně povrchu buzeného tělesa (v našem případě kolejnice). Současně je třeba se vyvarovat vícenásobných úderů čili odskoků kladívka, vytváří to potíže při zpracování signálů.

Výhodami této experimentální analýzy jsou snadná použitelnost v provozních podmínkách a rychlost daná praktickou absencí přípravných prací.

Nevýhoda buzení rázovým kladívkem spočívá ve velkém činiteli amplitudy  $A_{\max}/A_{\text{ef.}}$ , který způsobuje, v případě některých struktur nelineární odezvu a tím pádem se metoda stává nevhodná pro měření nelineární struktury.

V mé práci mi bude tato výhoda nápomocná pro srovnání laboratorních výsledků s výsledky zkoušky v terénu. Porovnáám tak jestli je mnou zkoušená metoda použitelná v praxi a jestli jsou podmínky laboratoře srovnatelné s reálnými podmínkami.

### **2.2.2 Buzení inerciálním budičem**

Elektrodynamický budič vibrací slouží k měření dynamických vlastností konstrukcí a konstrukčních dílců. Na základě výsledků měření je možné stanovit modální vlastnosti, jako je vlastní frekvence, tuhost a útlum. Získáním těchto údajů je možné ověřit výpočtový model, resp. stanovit potřebné výpočetní konstanty pro další výpočty a konstrukční úpravy. Pomocí měření elektrodynamickým budičem vibrací lze také určit frekvenční přenosovou funkci. Ta tvoří základ pro vibrační a akustickou analýzu jednotlivých součástek, nebo konstrukčních celků a jejich případné úpravy na eliminaci nežádoucích vlivů vibrací a hluku. Budič vibrací je navržen tak, aby po menších úpravách bylo možné provést i životnostní zkoušky cyklicky namáhaných součástek, nebo konstrukčních celků.

Optimální použití vibračního budiče předpokládá konstantní úroveň vibrací při různém druhu budících signálů. Kmitočtová charakteristika buzení není plochá, obsahuje rezonanční maxima a další rezonance zanáší testovaný objekt namontovaný na budiči. V rámci frekvenčního pásma se tedy zisk zesilovače musí měnit s kmitočtem. Tento zisk je nastavován kontrolérem, jenž dostává zpětnovazební informaci ze snímačů umístěných na testovaném objektu. K hlavním řídicím prvkům budiče patří generátor kmitočtu, měřič vibrací a obvod, který nastavuje úroveň. Digitální řídicí systém budiče tedy představuje výkonné a ekonomické řešení pro široké spektrum otřesových a vibračních testů. Ve spojení s elektrodynamickým budičem umožňuje reprodukovat vlivy skutečného prostředí v laboratorních podmínkách.

### **2.2.3 Typy budících signálů**

Pro testování konstrukcí se používá klasická průmyslová metoda testů náhodnými vibracemi, rozmítanými sinusovými kmity, otřesovými vibracemi i signály zemětřesení. Rozmítané sinusové kmity používáme z důvodu nutnosti zavedení širšího frekvenčního pásma, než nám nabízí pouhý sinus.

## Sinusové buzení

Jednoduchý sinusový signál konstantní frekvence se v modální analýze uplatní stěží. Pokud už takový signál používáme, tak v podobě krokovaného sinu v tzv. FRA analyzátořech (FRA - Frequency Response Analyzer), které na rozdíl od běžně používaných FFT analyzátorů neprovádějí Fourierovu transformaci signálu, ale přímo měří ustálenou odezvu systému na ustálené harmonické buzení. Frekvence buzení se krokově mění a zaznamenává se podíl odezvy a buzení. Takto postupně se vykreslí celá FRF v požadovaném frekvenčním pásmu. Tento proces je velmi pomalý, ale je to v podstatě jediná možnost, pokud chceme podrobně zkoumat nelinearity ve strukturách. Je zřejmé, že frekvenční pásmo může být zvoleno libovolně, takže obvykle se tento postup používá v souvislosti s frekvenční lupou ke zkoumání oblastí v okolí rezonancí.

## Buzení rozmítaným sinusem

Rozmítaný sinus je zvláštním případem pseudonáhodného signálu. Pseudonáhodný signál je vlastně kus náhodného signálu opakujícího se s periodou  $T$ . Tato perioda je rovna délce záznamu. V důsledku toho nedochází k chybě únikem, protože signál je v době záznamu periodický, takže použití váhových oken není nutné (obdélníkové okno = žádné okno). Čáry spektra se shodují s čarami analyzátoru a případné nelinearity vsystému se neodprůměrují. Tento typ signálu se tedy hodí pouze na dokonale lineární systémy. Stejně jako u náhodného signálu, je možné i pseudonáhodný signál použít jak na měření v základním pásmu, tak na měření s frekvenční lupou. Jde o rychle rozmítaný sinus, kdy se průchod od minimální frekvence k maximální opakuje každou periodu  $T$ , a tato perioda je rovna délce záznamu.

### 2.2.4 Útlum

Vybuzením rázu na konstrukci na ní vznikají vibrace. Vibracemi rozumíme jakýkoliv pohyb, který se opakuje v periodických intervalech. Mechanické kmitání je obecně v technické praxi nežádoucí a je převážně vyvozováno různými stroji nebo prostředky, např. dopravními prostředky. Vibrace jsou charakterizovány časovými závislostmi vektorů výchylky  $\vec{y} = \vec{f}(t)$ , rychlosti  $\vec{v} = \dot{\vec{f}}(t)$  a zrychlení  $\vec{a} = \ddot{\vec{f}}(t)$ . Kromě těchto veličin se pro charakterizaci vibrací používají i decibelové veličiny (např. hladinové veličiny podobně jako

v akustice). Jednou z decibelových veličin, která charakterizuje schopnost materiálů z hlediska tlumení mechanických vibrací, je přenosový útlum  $D_p$ , který je definován rovnicí:

$$D_p = 20 \times \log \frac{|v_1|}{|v_2|} = 20 \times \log \frac{|F_1|}{|F_2|}, \quad (2.1)$$

kde:  $v_1$  je amplituda rychlosti na vstupu 1 do kmitavé soustavy,  $v_2$  - amplituda rychlosti na výstupu 2 z kmitavé soustavy,  $F_1$  - amplituda síly na vstupu 1 do kmitavé soustavy a  $F_2$  - amplituda síly na výstupu 2 z kmitavé soustavy. Z hlediska velikosti přenosového útlumu mohou nastat (obecně při určité frekvenci kmitání) tři případy:

- $D_p > 0$ , kdy amplituda výstupní veličiny je menší ve srovnání s amplitudou vstupní veličiny a tím dochází k tlumení mechanických vibrací.
- $D_p = 0$ , kdy amplituda výstupní veličiny je rovna amplitudě vstupní veličiny a tím nedochází k žádnému přenosovému tlumení.
- $D_p < 0$ , kdy amplituda výstupní veličiny je větší ve srovnání s amplitudou vstupní veličiny a tím dochází k tzv. rezonanci.

Přenosový útlum závisí kromě typu materiálu zejména na frekvenci mechanického kmitání, dále na tloušťce materiálu, velikosti setrvačné zátěže, struktuře materiálu (např. objemová pórovitost, velikost a tvar pórů apod.), teplotě aj.

Platí tedy:

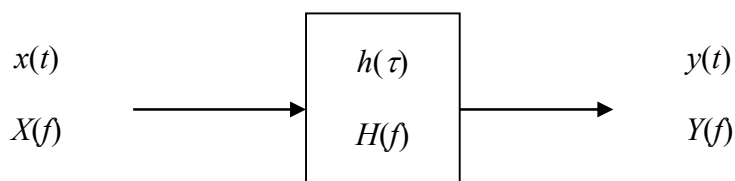
Přenosový útlum je decibelová veličina, která charakterizuje materiály z hlediska jejich schopnosti tlumit mechanické vibrace.

### 2.2.5 Přenosové funkce

Během měření chování zkoušeného objektu, většinou známe, nebo můžeme zjistit, pouze vstup (buzení) a výstup (odezvu) systému (impulsy, signály apod.), tedy podněty působící na systém a reakce systému na ně. Zkoumaný systém je pro nás tedy „černou skříňkou“, jejíž chování se snažíme analyzovat. Jeho vnitřní strukturu a mechanismus působení neznáme. Pro interpretaci chování neznámého systému se používá analýza signálů. Pomocí této analýzy se zjišťuje odezva systému na známé, nebo měřené, buzení. Charakteristiky vycházející z přenosové funkce (přenosu) používáme k popisu (lineárních)



systemů. Jsou to funkce vyjadřující poměr odezvy v místě  $i$  na vstup v místě  $j$ . V tomto smyslu postupujeme u dynamických soustav, kde není potřeba okamžité interpretace, využíváme transformaci do frekvenční popř. časové oblasti. Ze znalostí přenosové funkce můžeme usuzovat na chování systému, „černé skříňky“ (Obr. 2.3 Přenos systému (černé skříňky) ).



Obr. 2.3 Přenos systému (černé skříňky)

Pro přenosovou funkci platí vztah:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) \cdot x(t - \tau) \cdot d\tau = h(t) * x(t), \quad (2.2)$$

kde

- $x(t)$  je vstupní signál (buzení),
- $y(t)$  je výstupní signál (odezva na vstupní signál) resp. jeho Fourierův obraz  $X(f)$ ,
- $h(t)$  je přenosová funkce.

Výstupní signál můžeme určit také ze spekter

$$Y(f) = H(f) \cdot X(f), \quad (2.3)$$

kde

- $X(f)$  je frekvenční přenos  $x(t)$   $X(f) = F\{x(t)\}$ ,
- $Y(f)$  je frekvenční přenos  $y(t)$   $Y(f) = F\{y(t)\}$ ,
- $H(f)$  je frekvenční přenos  $h(t)$   $H(f) = F\{h(t)\}$ .

Dále budeme  $F\{\}$  značit Fourierovu transformaci a  $F^{-1}\{\}$  její inverzní funkci. Z toho plyne tvar rovnice přenosové funkce

$$h(t) = F^{-1}\{H(f)\} = F^{-1}\left\{\frac{Y(f)}{X(f)}\right\}. \quad (2.4)$$

## 2.2.6 Fourierova transformace

Fourierova transformace je nejvíce používanou metodou pro převod z časové do frekvenční oblasti, která je definována vztahem:

$$X(f) = k_1 \cdot \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot e^{-j2\pi ft} \cdot dt, \quad (2.5)$$

pro zpětnou transformaci potom vztahem:

$$x(t) = k_2 \cdot \int_{-\infty}^{\infty} X(f) \cdot e^{j2\pi ft} \cdot df, \quad (2.6)$$

kde

- $f$  je frekvence,
- $t$  je čas,
- $x(t)$  je signál v časové oblasti,
- $X(f)$  je signál ve frekvenční oblasti,
- $k_1$  a  $k_2$  (v těchto případech rovny jedné).
- $j$  je imaginární jednotka

Pro analýzu signálu je nejdůležitější zachovat Parsevalův zákon zachování energie, který říká, že energie signálu se transformací nezmění. Platí tedy:

$$E = k_1 \cdot \int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 \cdot dt = k_2 \cdot \int_{-\infty}^{\infty} |X(f)|^2 \cdot df, \quad (2.7)$$

kde:

- $E$  je celková energie signálu  $x(t)$  resp.  $X(f)$ ,
- $k_1$  a  $k_2$  jsou konstanty.

### 3 MĚŘENÍ

V této kapitole bude popsána metodika měření co se týče uspořádání zkoušky a rozmístění snímačů. Dále bude popsán průběh měření doplněný o fotografie. Kompletní fotodokumentace je součástí přílohy A Fotodokumentace.

#### 3.1 MĚŘENÍ VIBRACÍ

Při měření parametrů mechanického kmitání je možnost si vybrat jakou součást budeme měřit, může to být:

- Zrychlení mechanického kmitání  $a$  [ $\text{m/s}^2$ ];
- Rychlost mechanického kmitání  $v$  [ $\text{m/s}$ ];
- Výchylka mechanického kmitání  $y$  [ $\text{m}$ ].

Mezi těmito veličinami platí jednoduchý převodní vztah:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2y}{dt^2} . \quad (3.1)$$

Pro účely měření je možné použít pouze jeden typ snímače, jelikož za pomoci moderních technologií je jednoduché získat další veličiny z integračních a derivačních vztahů. V našem případě bylo použito měření za pomoci piezoelektrického snímače. Tento snímač je citlivý na veličinu zrychlení mechanického kmitání.

Tato metoda je běžně používaná, není tedy důvod, proč ji nepoužít i v našem případě. Piezoelektrický snímač slouží k přeměnění naměřeného kmitání na elektrický signál, který je dále přiváděn na předzesilovač. Podrobný popis funkce a zapojení aparatury v kapitole 3.3.2.

#### 3.2 ZKOUŠENÉ VZORKY

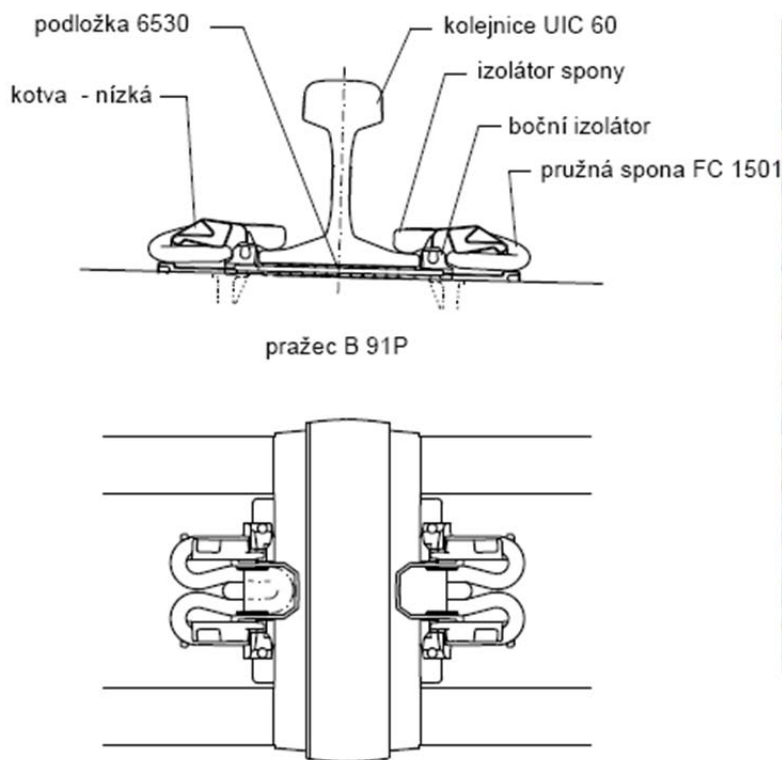
Pro účely práce bylo použito 6 typů částí kolejových roštů skládající se z:

- části pražce B 91P a upevnění Pandrol FC I;
- části pražce B 91S/1 a upevnění Vossloh W 14;
- části pražce B 91S/1 a upevnění Vossloh W 14 (s novými komponenty);
- části pražce B 91S/1 a upevnění Vossloh W 14NT;

- části pražce B 91S/1 a upevnění Vossloh W 21;
- části pražce B 91S/1 a upevnění Vossloh E 14.

Rozdíl mezi pražcem B 91P a B 91S/1 je pouze v přizpůsobení pražce pro upevnění daného typu upevnění. Úložná plocha pod kolejnicí je v příčném sklonu 1:40. Při každém měření byla instalována část kolejnice UIC60. Kolejové rošty pro měření byly sestaveny podle předpisu SŽDC S3 díl VII z něhož jsou čerpány jak obrázky, tak tabulky přehledu materiálu a montáže vyjma upevňovadla Vossloh W 21, které se na území České republiky používá ve zkušebním provozu. Cílem této práce je srovnání vlastností jednotlivých typů upevnění a dále také srovnání stavů dotažení u upevnění Vossloh. Dalším cílem je srovnání konvenční metody měření pomocí buzení rázovým kladivem a metody buzení elektrodynamickým budičem.

### 3.2.1 Pražec B 91P a upevnění Pandrol FC I



Obr. 3.1 Sestava s upevněním Pandrol FC I



Obr. 3.2 Fotografie z Měření

Tab3.2 Montáž

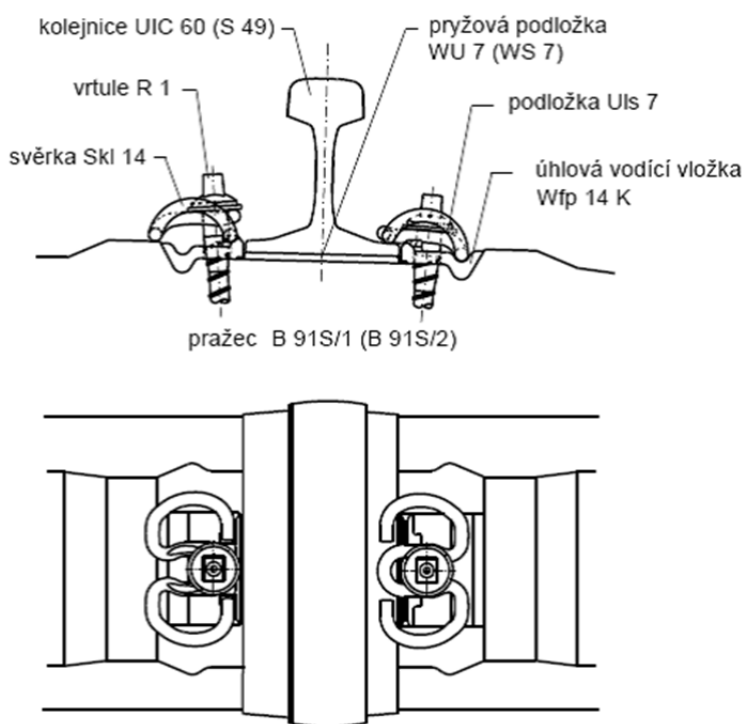
Tab. 3.1 Přehled materiálu

Kolejnice	UIC 60
pražce	B 91P
pružné spony	FC 1501
podložka pod patu kolejnice	6530
izolátor spony	8494
boční izolátor	7049
kotva Fastclip	7840 (8081)
šrouby spojkové	M 24 x 165 a M 24
spojky	U 60I
dvojitě pružné kroužky Fe 6	pod matici spojkového šroubu

Způsob montáže		a) Montážní ruční páka pro sponu Fastclip b) Stroje pro zasouvání a vysouvání spony Fastclip
Požadovaný stav po montáži		Zapadnutí vybrání na koncích vnějších ramen spony Fastclip na výstupky v kotvě
Hodnota utahovacího momentu	doporučená limitní	
Kontrola správnosti montáže		Pohledem
Poznámka		

### 3.2.2 Pražec B 91S/1 a upevnění Vossloh W 14

Pro upevnění Vossloh W 14 (s novými komponenty) bylo použito stejné skladby jako pro upevnění Vossloh W 14. Tento typ upevnění je v současnosti na území České republiky jedním z nejpoužívanějších. Jako pryžová podložka byla použita podložka WU 7.



Obr. 3.3 Sestava s upevněním Vossloh W 14



Obr. 3.4 Fotografie z měření

Tab. 3.3 Přehled materiálu

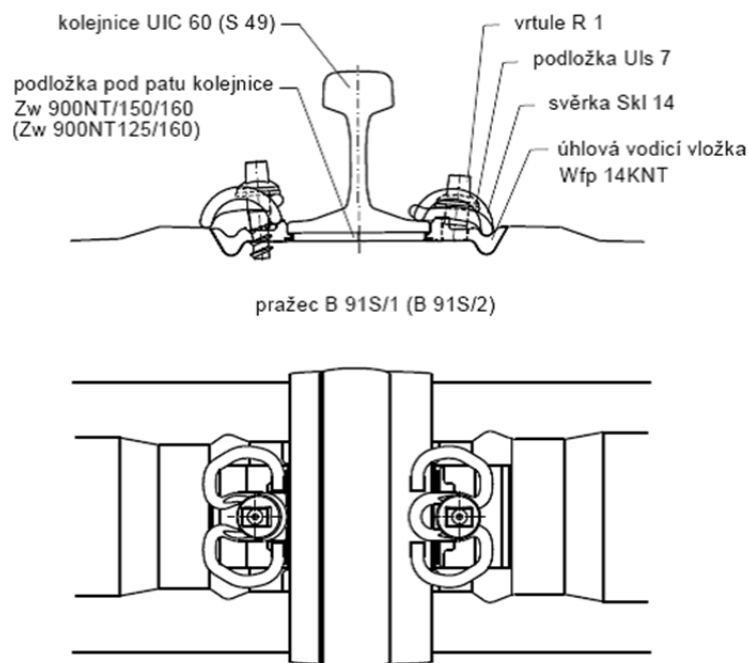
Kolejnice	UIC 60
pražec	B 91S/1
pružné svěrky	Skl 14
vrtule	R 1
podložky pod hlavu vrtule	Uls 7
pryžové podložky pod patu kolejnice	WU 7 / Zw 900NT (165 x 160 x 9)
úhlové vodící vložky	Wfp 14K 600 / Wfp 14KNT
spojky	U 60I
šrouby spojkové a matice	M 24 x 165 a M 24
dvojitě pružné kroužky Fe 6	pod matici spojkového šroubu

Tab3.4 Montáž

Druh pražce	Betonový pražec s hmoždinkami z PA 30SV <sup>(9)</sup>	
Způsob montáže	a) Zatačička s nastavitelným utahovacím momentem b) Momentový klíč <sup>(1)</sup>	
Požadovaný stav po montáži	Dosednutí středního ramene svěrky do lůžka plastové úhlové vodící vložky	
Hodnota utahovacího momentu	doporučená	180 - 220 Nm
	limitní	max. 220 Nm
Kontrola správnosti montáže	Pohledem Momentovým klíčem <sup>(2)</sup>	
Poznámka	Vrtule musí být před montáží ošetřena předepsaným mazacím prostředkem <sup>(5)</sup>	

### 3.2.3 Pražec B 91S/1 a upevnění Vossloh W 14NT

Tato sestava upevnění je poměrně nová a je používána pro oblouky s malými poloměry.



Obr. 3.5 Sestava s upevněním Vossloh W 14NT



Obr. 3.6 Fotografie z měření

Tab. 3.5 Přehled materiálu

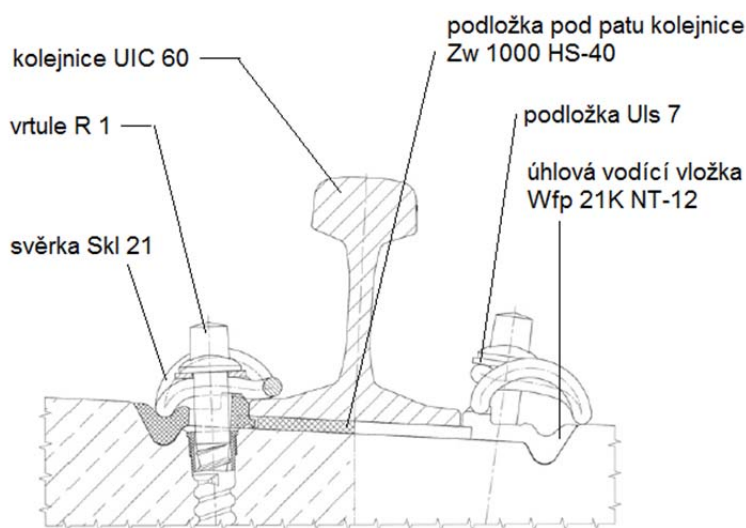
Kolejnice	UIC 60
pražec	B 91S/1
pružné svěrky	Skl 14
vrtule	R 1
podložky pod hlavu vrtule	Uls 7
pružné podložky pod patu kolejnice	WU 7 / Zw 900NT (165 x 160 x 9)
úhlové vodicí vložky	Wfp 14K 600 / Wfp 14KNT
spojky	U 60I
šrouby spojkové a matice	M 24 x 165 a M 24
dvojitě pružné kroužky Fe 6	pod maticí spojkového šroubu

Tab3.6 Montáž

Druh pražce	Betonový pražec s hmoždinkami z PA 30SV <sup>(6)</sup>	
Způsob montáže	a) Zatačička s nastavitelným utahovacím momentem b) Momentový klíč <sup>(1)</sup>	
Požadovaný stav po montáži	Dosednutí středního ramene svěrky do lůžka plastové úhlové vodicí vložky	
Hodnota utahovacího momentu	doporučená	180 - 220 Nm
	limitní	max. 220 Nm
Kontrola správnosti montáže	Pohledem Momentovým klíčem <sup>(2)</sup>	
Poznámka	Vrtule musí být před montáží ošetřena předepsaným mazacím prostředkem <sup>(5)</sup>	

### 3.2.4 Pražec B 91S/1 a upevnění Vossloh W 21

Toto na území České republiky nové upevnění je používáno také pro oblouky malých poloměrů. Zkušební úsek, kde můžeme najít toto upevnění je na trati Brno-Adamov.



Obr. 3.7 Sestava s upevněním Vossloh W 21



Obr. 3.8 Fotografie z měření

Tab. 3.7 Přehled materiálu

Kolejnice	UIC60
pražce	B 91S/1
pružné svěrky	Skl 21
vrtule	R 1
podložky pod hlavu vrtule	Uls 7
podložka pod patu kolejnice	Zw 1000 HS-40
úhlové vodící vložky	Wfp 21K NT-12

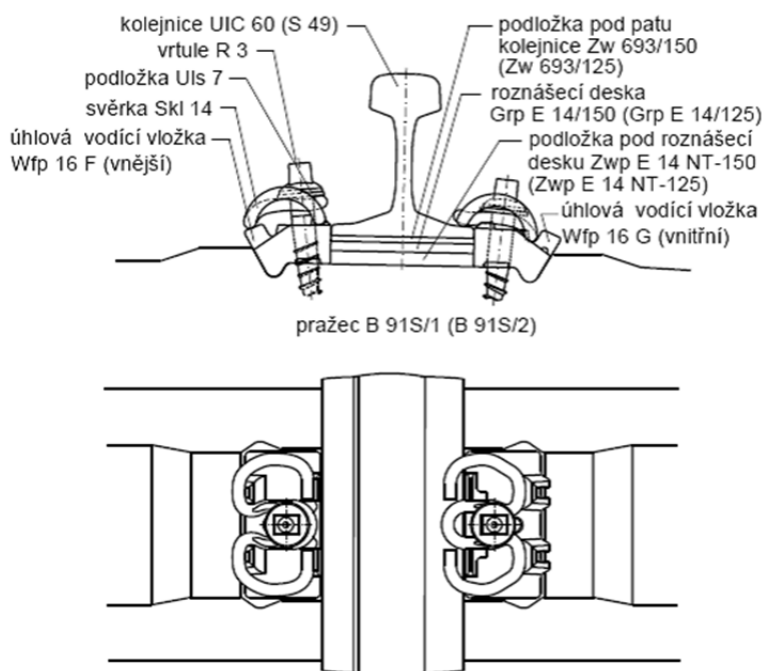
Tab3.8 Montáž

Druh pražce	Betonový pražec s hmoždinkami z PA 30SV <sup>(9)</sup>	
Způsob montáže	a) Zatačička s nastavitelným utahovacím momentem b) Momentový klíč <sup>(1)</sup>	
Požadovaný stav po montáži	Dosednutí středního ramene svěrky do lůžka plastové úhlové vodící vložky	
Hodnota utahovacího momentu	doporučená limitní	180 - 220 Nm max. 220 Nm
Kontrola správnosti montáže	Pohledem Momentovým klíčem <sup>(2)</sup>	
Poznámka	Vrtule musí být před montáží ošetřena předepsaným mazacím prostředkem <sup>(5)</sup>	



### 3.2.5. Pražec B 91S/1 a upevnění Vossloh E 14

Upevnění Vossloh E 14 je upevnění se zvýšenou svislou pružností. Toto upevnění je vhodné tam, kde je potřeba zvýšit tlumení dynamických účinků, resp. snížit emitovanou hladinu hluku. Původně bylo vyvinuto pro pevnou jízdní dráhu, kde pružná podložka nahrazuje tlumící účinky celého kolejového lože. Dodatečně byl tento systém aplikován i na klasické konstrukci koleje v kolejovém loži.



Obr. 3.9 Sestava s upevněním Vossloh E 14



Obr. 3.10 Fotografie z měření

Tab. 3.9 Přehled materiálu

Kolejnice	UIC 60	Druh pražce	Betonový pražec s hmoždinkami z PA 30SV <sup>(9)</sup>
pražce	B 91S/1	Způsob montáže	a) Zatačička s nastavitelným utahovacím momentem b) Momentový klíč <sup>(1)</sup>
pružné svěrky	Skl 14	Požadovaný stav po montáži	Dosednutí středního ramene svěrky do lůžka plastové vodící vložky
vrtule	R 3	Hodnota utahovacího momentu	doporučená 180 - 220 Nm limitní max. 220 Nm
podložky pod hlavu vrtule	Uls 7	Kontrola správnosti montáže	Pohledem Momentovým klíčem <sup>(2)</sup>
spočky	U 60I	Poznámka	Vrtule musí být před montáží ošetřena předepsaným mazacím prostředkem <sup>(5)</sup>
šrouby spojové a matice	M 24 x 165 a M 24		
podložky pod patu kolejnice	Zw 693/150		
roznášecí deska	Grp E 14/150		
dvojitě pružné kroužky Fe 6	pod matici spojového šroubu		
podložka pod roznášecí desku	Zwp E 14 NT-150 <sup>(1)</sup>		
vodící vložka vnitřní	Wfp E 16 G (vnitřní)		
vodící vložka vnější	Wfp E 16 F (vnější)		

Tab3.10 Montáž



### 3.3 USPOŘÁDÁNÍ ZKOUŠKY

#### 3.3.1 Popis součástí aparatury

Cílem bakalářské práce bylo změřit a zpracovat přenosové funkce a hodnoty tlumení pro jednotlivé kombinace kolejového roštu a metody buzení. Jako metody buzení byly vybrány: konvenční metoda rázového kladiva, jednak pro její jednoduchost a rychlost a také pro její rozšíření. Je to tedy ověřená metoda buzení.; metoda buzení pomocí elektrodynamického budiče. Tato metoda není pro tyto účely používána, bylo zajímavé srovnat ji s metodou buzení rázem a porovnat jejich výsledky. K měření byly po vyzkoušení zvoleny níže popsané snímače. Snímače, v našem případě akcelerometry jsou použity jak pro získání signálu na vstupu (akcelerometr pro řízení budiče, akcelerometr v kladivu), tak na výstupu (kolejnice, pražec, šterkové lože). Pomocí těchto snímačů a modulárního analyzátoru byly získány přenosové funkce, v našem případě odhad frekvenční odezvové funkce  $H_3$  pro buzení rázem a amplitudové spektrum pro buzení elektrodynamickým budičem. Modulární analyzátor a jeho software byl nápomocen také při úloze časové analýzy. Pro účely práce byla tedy pro měření vibrací použita aparatura skládající se z:

- budicího zařízení a to:
  - o budicí kladivo Brüel-Kjaer typ 8210 Impact hammer s budícím hrotem typu Hard tip black (0,7-6,4 kHz);
  - o elektrodynamický budič TIRA;
- 3x akcelerometr Brüel-Kjaer, snímače na konstrukci, parametry viz. tabulka 3.11;
- 1x akcelerometr Brüel-Kjaer, snímač pro řízení budiče, parametry viz. tabulka 3.11;
- modulární analyzátor PULSE Brüel-Kjaer

Tab. 3.11 Vlastnosti akcelerometru

typ akcelerometru	hmotnost [g]	citlivost [mV/g]	frekvenční rozsah [Hz]	hladina vibrací [g]
4507 B-004	4,8	100	0,3-6000	700

#### 3.3.2 Popis zapojení a funkce aparatury

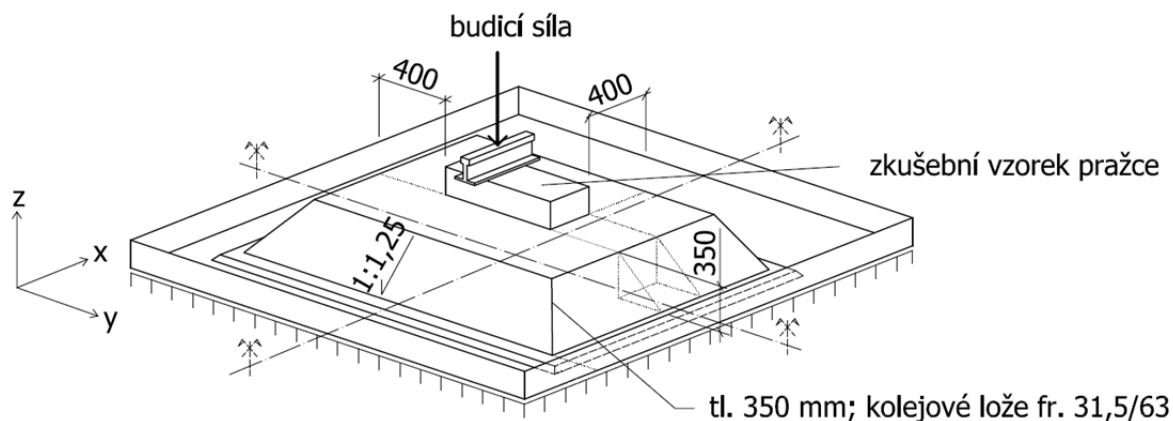
Měřicí řetězec se skládá ze snímací části a měřící části. Snímací část je tvořena samotným snímačem, předzesilovačem a integrátorem. V našem případě je předzesilovač součástí modulárního analyzátoru PULSE. Funkce zesilovače náboje nám umožňuje použít

delší kabely vedoucí od snímače k předzesilovači. Integrátor dále umožňuje s měřeným signálem operace vedoucí ke stanovení ostatních než snímaných veličin. Náš snímač snímá zrychlení. Integrátor nám umožňuje stanovit také ostatní vlastnosti mechanického kmitání a to jeho rychlost a výchylku. Následují části měřicího systému. Aby pracovní kmitočtový rozsah přístroje odpovídal kmitočtovému pásmu měřeného kmitání a současně byly omezeny nežádoucí vlivy šumu s nízkými a vysokými frekvencemi a zároveň vlastní rezonance použitého snímače mechanického kmitání bývá za snímací částí řazena hornofrekvenční a za ní dolnofrekvenční propust. Dále je řazen zesilovač pro zesílení signálu na požadovanou velikost. Za zesilovačem jsou připojeny kmitočtové filtry jako pásmové propusti a úzkopásmové filtry umožňující selektivní měření mechanického kmitání, popřípadě jeho kmitočtovou analýzu. Dalším členem měřicího řetězce je usměrňovač. Ten může vyhodnocovat buď efektivní hodnotu, nebo maximální rozkmit měřeného signálu.

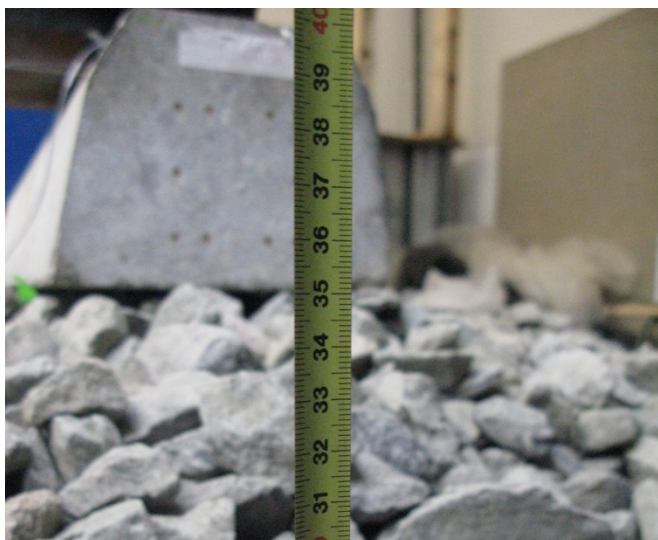
### 3.3.3 Popis uspořádání zkoušky

#### Popis místa pro měření

Pro provedení měření v rámci této práce bylo vyhrazeno místo v prostorách areálu VUT FAST v laboratoři ÚPKO a ÚŽKS. Zde byl do vany 2x2 metry navezen štěrk 31,5/63 do výšky 350mm pod pražcem (viz Obr. 3.11 a Obr. 3.12). Na takto simulované kolejové lože byly postupně umisťovány vzorky upevnění na pražcích (dle kapitoly 3.2). Vzorky byly volně uloženy na lože. Nebylo potřeba přihrnovat štěrk okolo pražců. Tento přihrnutý štěrk na trati slouží pro přenos příčných a rovnoběžných sil, které při našem pokusu nevznikaly a tak nebylo potřeba bránit jejich účinkům.



Obr. 3.11 Schéma místa pro měření

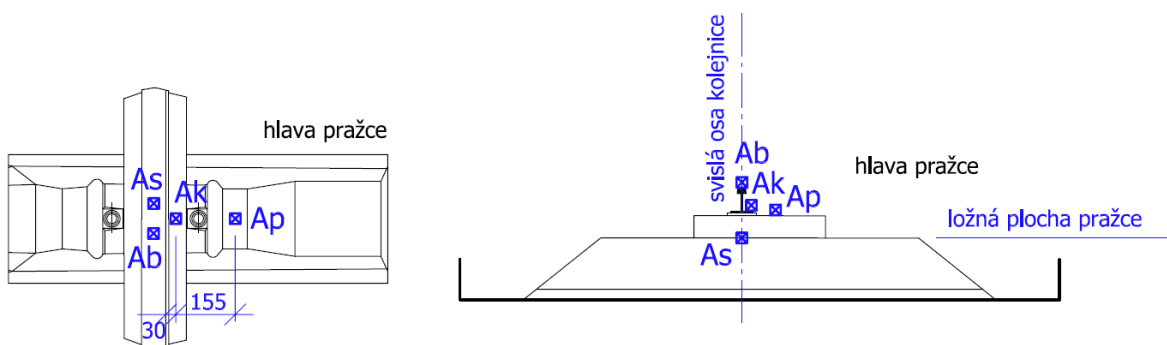


*Obr. 3.12 Výška štěrkového lože*

Další část měření byla provedena na trati Brno-Blansko, kde se nachází hlavní zástupci zkoušené skupiny upevnění. Jsou to upevnění Pandrol FC I a Vossloh W 14.

### **Schéma umístění snímačů**

Rozmístění snímačů mechanického kmitání na kolejnici pražci a ve štěrkovém loži bylo vybráno tak, aby odpovídalo rozmístění při měření v terénu. Tímto způsobem bylo možné srovnat jestli je měření prováděné v laboratoři srovnatelné s měřením v terénu. Je to směrodatné pro další výzkum. Bude-li toto měření srovnatelné, bude tato práce vhodná jako základ pro zkoušení součástí kolejového roštu v laboratorních podmínkách tak, aby co nejvíce simulovaly podmínky na trati. Umístění snímačů je jasné z Obr. 3.13.



- Ab ... snímač na budiči (v případě eldyn. vibrátoru bude akcelerometr umístěn na roznášecí desce)
- Ak ... snímač na patě kolejnice
- Ap ... snímač na hlavě pražce
- As ... měřicí kámen na ložné ploše pražce

*Obr. 3.13 Schéma umístění snímačů*

Snímače byly na místo fixovány pomocí včelího vosku. Včelí vosk je skvělým materiálem pro připevnění snímačů. Přilne k měřené části konstrukce a nijak neovlivňuje výsledky měření. Nedochází tedy při měření ke ztrátě ani ke zkreslení naměřených hodnot. Snímač Ab byl součástí budícího kladiva nebo v případě elektrodynamického budiče byl voskem připevněn na roznášecí desku. Snímač Ak byl umístěn 30mm od stojiny kolejnice na patě kolejnice. Snímač Ap byl umístěn 185mm od stojiny kolejnice na hlavě pražce. Oba snímače byly fixovány včelím voskem. Snímač As byl umístěn v takzvaném měřicím kameni (Obr. 3.14). V tomto kameni byl zafixován opět pomocí včelího vosku. Měřicí kámen byl vložen pod ložnou plochu pražce v ose kolejnice. Byl zaklíněn tak, aby nedocházelo k jeho vibracím, které by ovlivňovali výsledky měření.



*Obr. 3.14 Osazení snímače do měřicího kamene*

Pro měření v terénu byly snímače umístěny na stejných místech. Z pochopitelných důvodů nebylo možné použít snímač ve šterkovém loži. Pro jednoduchost měření v terénu byla zvolena pouze metoda buzení rázovým kladivem (Obr. 3.15)



*Obr. 3.15 Měření v terénu na upevnění Pandrol FC I*

### **3.4 PRŮBĚH MĚŘENÍ**

Pro buzení vibrací byly dle metodiky měření vybrány dvě metody. Metoda měření odezvy na ráz budícím kladivem a metoda buzení pomocí elektrodynamického budiče. tyto dvě metody ještě nebyly porovnány a jejich porovnání je jedním z cílů práce. V tomto ohledu jsou měření v práci unikátní a jejich srovnání může být velice užitečné pro budoucí testování součástí kolejového roštu v laboratorních podmínkách. Měření bylo následně vyhodnoceno v časové a frekvenční oblasti a bylo odečteno tlumení na významných frekvencích na normových stavech montáže upevnění (Kap. 3.4.3)

#### **3.4.1 Buzení rázovým kladivem**

Pro měření vibrací byla jako první metoda vybrána metoda buzení rázovým kladivem. Měření byla v tomto pořadí: Pandrol FCI, Vossloh W 14, Vossloh W 14 NT, Vossloh W 21, Vossloh E14 a Vossloh W 14 (nové komponenty). Měření rázovým kladivem, kdy známe jak vstupní tak výstupní funkci, nám umožní zobrazení frekvenční přenosové funkce (Kap. 2.2.5).

## **Pandrol FC I**

Prvním zkoušeným vzorkem bylo upevnění Pandrol FC I. Před samotným měřením bylo šestkrát cvičně udeřeno do hlavy kolejnice pro ustálení a otestování vlastností kolejového roštu. Na tomto upevnění bylo provedeno celkem šest měření vždy po deseti úderech, pro nalezení optimálního měřicího rozsahu. Z těchto měření tři byly v měřicím rozsahu 0Hz-500Hz a 3 v 0Hz-1000Hz.

## **Vossloh W 14**

Před samotným měřením bylo opět šestkrát udeřeno pro ustálení a otestování vlastností kolejového roštu. Pro toto upevnění bylo provedeno celkem dvanáct měření po deseti úderech pro zjištění optimálního nastavení měřicí a budicí aparatury. Po této sadě měření bylo podle výsledků rozhodnuto tak, že se další měření budou provádět ve frekvenčním rozsahu 0Hz-1000Hz. Toto měření bylo první měření ze skupiny upevnění Vossloh, byla zde tedy podle zvolené metodiky provedena měření stavu nedotaženého (150MN), předpisově dotaženého (200MN) a přetaženého (250MN). Tento způsob měření nám dovolí ověřit, je-li z výsledků měření možno poznat stav dotažení vrtule a vliv dotažení na šíření vibrací. Pro nedotažený a přetažený stav byly tedy uskutečněny dvě dvojice měření po deseti úderech v měřicím rozsahu 0Hz-1000Hz a pro stav předpisově dotažený tři měření po deseti úderech taktéž v rozsahu 0Hz-1000Hz.

## **Ostatní upevnění Vossloh**

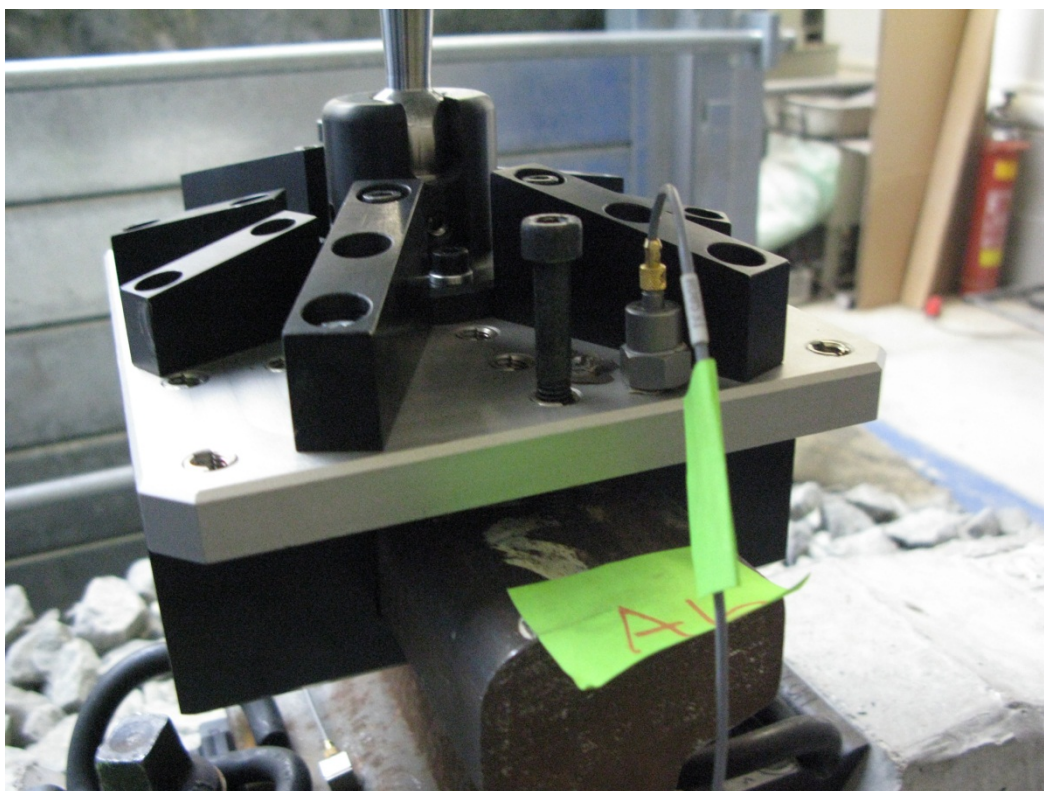
Pro ostatní upevnění se už postupovalo vždy stejně podle vlastností budicí a měřicí soustavy zjištěných na upevnění Vossloh W 14. Bylo tedy vždy šestkrát udeřeno do hlavy kolejnice pro ustálení vlastností. Samotné měření obsahovalo vždy dvě dvojice měření po deseti úderech pro nedotažený a přetažený stav a tři měření po deseti úderech pro předpisově dotažený. Měření bylo vždy provedeno v měřicím frekvenčním rozsahu 0-1000Hz.

Z měření upevnění Pandrol FC I jsme tedy získali tři trojice signálů a ze všech ostatních měření na upevnění Vossloh dvakrát dvě trojice signálů pro nedotažený a přetažený stav a tři trojice signálů pro předpisově dotažený stav. Tyto signály a jejich přenosové funkce budou předmětem srovnání dle metodiky měření.



### 3.4.2 Buzení elektrodynamickým budičem

Elektrodynamický budič na rozdíl od rázového kladiva není vybaven vlastním snímačem zrychlení. Pro udržení stále stejné hladiny zrychlení budiče je třeba na roznášecí desku budiče umístit snímač, který předává data elektrickému kontroleru starajícího se o jeho plynulý chod (Obr. 3.16).



*Obr. 3.16 Umístění snímače zrychlení na roznášecí desce*

Ostatní snímače byly umístěny shodně s měřením pomocí budícího kladiva, dle metodiky popsané dříve (Kap. 3.3.3). Proběhlo celkem dvanáct měření z toho dvě na upevnění Pandrol FC I a dvě měření pro každé upevnění Vossloh. Rozdíl ve dvojici měření prováděné na jednom upevnění byl ve zrychlení, které bylo generováno samotným budičem. V jednom případě bylo nastaveno na  $10\text{m/s}^2$  a v druhém  $5\text{m/s}^2$ . Vzhledem k rozsahu práce a časovým možnostem již nebylo prováděno měření s nedotaženými a přetaženými vrtulemi. Daným způsobem jsme získali dvanáct trojic spekter. Pro vyhodnocení bude použita sada šesti měření při zrychlení budiče  $10\text{m/s}^2$ . Tato sada se více blíží použití rázového kladiva a je na ní zřetelnější průběh závislosti zrychlení na dané frekvenci. Pouze ve třech případech bylo využito buzení se zrychlením  $5\text{m/s}^2$  (více v kap. 4.1.2)

### 3.4.3 Měření v terénu

Pro ověření metodiky měření bylo provedeno měření v terénu na trati Brno-Blansko. Na tomto úseku jsou použity dva typy upevnění a to Pandrol FC I a Vossloh W 14. Na těchto dvou upevněních bylo provedeno měření vibrací pomocí rázového kladiva. Umístění snímačů bylo provedeno shodně s metodikou měření použitou pro laboratoř (Obr. 3.17). Z pochopitelných důvodů (bezpečnost provozu) nebyl použit snímač v měřicím kameni a dotahování či povolování vrtulí. Měření proběhlo stejně jako v laboratoři a to tři měření pro každé upevnění po deseti úderech kladivem v měřicím rozsahu 0Hz-1000Hz. Výstupem jsou tedy dvakrát tři dvojice signálů pro dva typy upevnění, tři opakování měření a dva snímače.



*Obr. 3.17 Umístění snímačů v terénu*



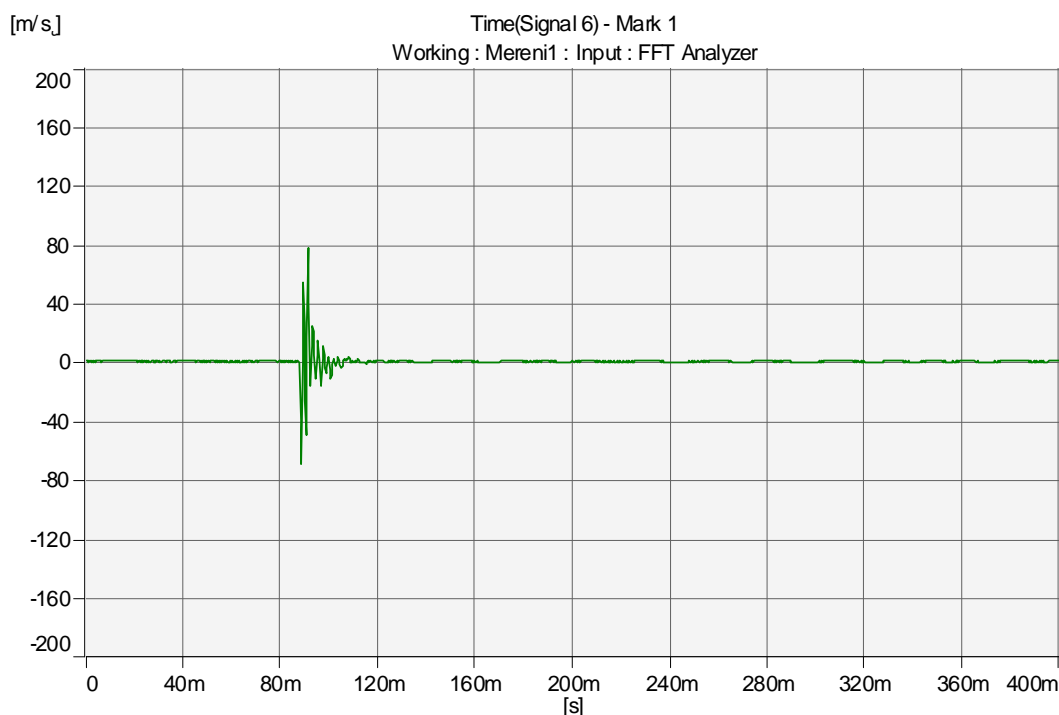
## 4 VYHODNOCENÍ

Naměřená data byla zpracována pomocí programu ME'Scope, který data z modulárního analyzátoru PULSE zpracoval do formy frekvenčních přenosových funkcí, nebo v případě buzení elektrodynamickým budičem do funkcí frekvenčních spekter. Program ME'Scope je určen pro zpracování problémů experimentální modální analýzy a je tedy vhodným nástrojem pro řešení tohoto problému. Data získaná programem ME'Scope byla exportována jako textový soubor a poté programem Excel uspořádána do skupin grafů, přehledně uspořádaných podle řešeného problému. Tento program byl taktéž nástrojem pro získání hodnot útlumu. Pro vyhodnocení v časové oblasti byl použit samotný software měřicího zařízení (konkrétně software PULSE v modulech 7700,7701 a 7705).

### 4.1 VYHODNOCENÍ VIBRACÍ

V rámci této bakalářské práce bylo vypracováno vyhodnocení vibrací v časové a frekvenční oblasti. Jako výstup byly sestaveny sady grafů srovnávající jednotlivé varianty.

#### 4.1.1 Vyhodnocení v časové oblasti



*Graf 4.1 Časová analýza průběhu buzení; ráz; Vossloh W14; kolejnice*

Pro vyhodnocení v časové oblasti bylo využito softwaru měřícího zařízení. Takto vyhodnocena byla pouze data z měření při buzení rázem, na kterých je přehledně vyobrazen průběh buzení. Byly získány funkce zrychlení vibrací v závislosti na jejich trvání. Na těchto grafech, přehledně uspořádaných v příloze H Vyhodnocení v časové oblasti, vidíme přesný průběh měření. Po úderu budícím kladivem do kolejnice dochází k rozvoji vibrací, které jsou časem utlumeny. Takovýto průběh je patrný na všech součástech konstrukce. Nejlépe pak na kolejnici (Graf 4.1). Tento způsob nebyl vybrán pro srovnání jednotlivých měření. Pro srovnání byla vybrána analýza dat ve frekvenční oblasti (Kap. 4.1.2), na ni také navazuje odečet tlumení na jednotlivých součástech konstrukce. Pro další řešení problematiky této bakalářské práce doporučuji využití i metody časové analýzy, na které je názorně vidět po jakou dobu a s jakou intenzitou je konstrukce rozvibrována.

#### **4.1.2 Vyhodnocení ve frekvenční oblasti**

Při vyhodnocování ve frekvenční rovině byly vytvořeny skupiny grafů odhadů frekvenčních odezvových funkcí  $H_3$  pro buzení rázem a skupiny grafů amplitudových spekter pro buzení elektrodynamickým budičem. Na těchto grafech byly hledány významné frekvence. Bylo provedeno srovnání změn významných frekvencí ve třech pásmech: 0Hz-80Hz, 80Hz-400Hz a 400Hz-1000Hz. V pásmu 0Hz -80Hz se na trati projevuje vliv vozidel, jejich vliv na geometrii a stav podvozku, v pásmu 80Hz-400Hz pak imperfekce jízdní dráhy a její chování na styku kola a kolejnice, pásmo 400Hz-1000Hz je významné spíše z hlediska akustického. Toto rozdělení není až tak striktní, tedy hodnoty blížíící se k hraničním hodnotám mohu řadit do přilehlých pásem dle vlivu na konstrukci.

##### **4.1.2.1 Srovnání způsobů buzení**

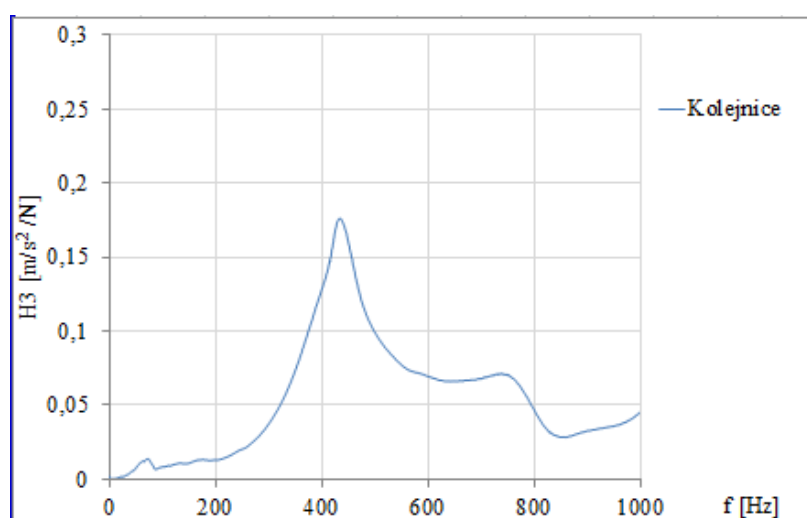
Pro srovnání budících způsobů byly vybrány dvě metody. První metodou bylo buzení pomocí rázového kladiva. Tato metoda je používána jak pro laboratorní měření, tak pro měření v terénu. Je používána pro svou rychlost a lehkou přenositelnost. Druhou ze srovnávaných metod bylo buzení pomocí elektrodynamického budiče. Účelem tohoto srovnání je zjištění, jestli jsou tyto metody buzení srovnatelné a mohou být použity pro účely měření dynamických parametrů kolejového roštu.

Pro názornost jsem provedl srovnání metod buzení pro upevnění Pandrol FC I a Vossloh W14. Tato upevnění jsou hojně používána a byla také použita pro srovnání s měřením v terénu (podrobněji v kapitole 4.1.2.4 Srovnání měření v laboratoři a v terénu).

Ostatní měření budou zhodnocena jen okrajově, přesné informace jsou součástí přílohy B Srovnání způsobů buzení.

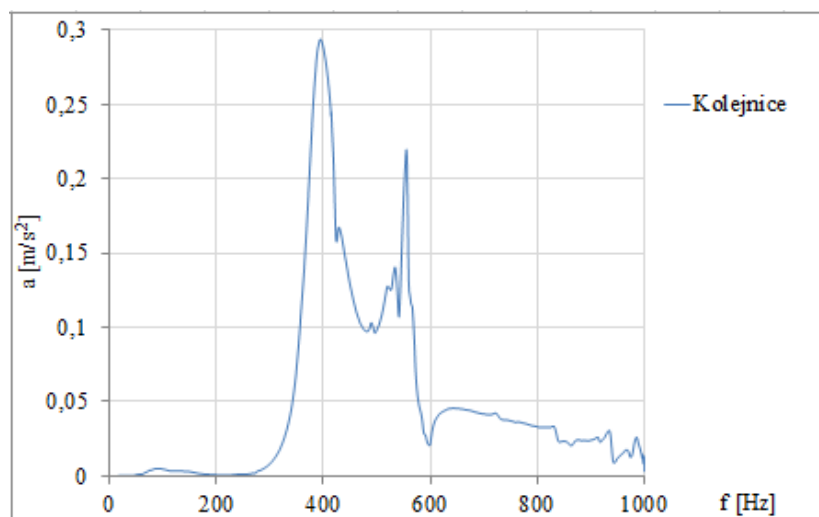
Získané signály bylo možno oddělit a získat tak samostatné grafy pro hodnoty spekter na kolejnici, pražci a v kolejovém loži. Signál kolejnice je pro jasné pochopení uveden jak zde, tak v příloze B Vyhodnocení způsobů buzení. Z těchto grafů byly odečteny významné frekvence, které byly mezi sebou porovnány. Tyto významné frekvence jsou zjišťovány ve vrcholech.

Pro upevnění Pandrol FC I buzení rázem byly pro signál z kolejnice odečteny významné frekvence v prvním pásmu 60Hz, ve druhém 430Hz a ve třetím 730Hz (pro ilustraci Graf 4.2). Pro signál na pražci to byly pro první pásmo frekvence 70Hz, pro druhé frekvence 160Hz a 400Hz a pro pásmo třetí 730Hz a 840Hz. Pro signál v kolejovém loži to byly pro první pásmo frekvence 70Hz, pro druhé pásmo 120Hz-170Hz, 410Hz a pro třetí pásmo 730Hz a 830Hz.

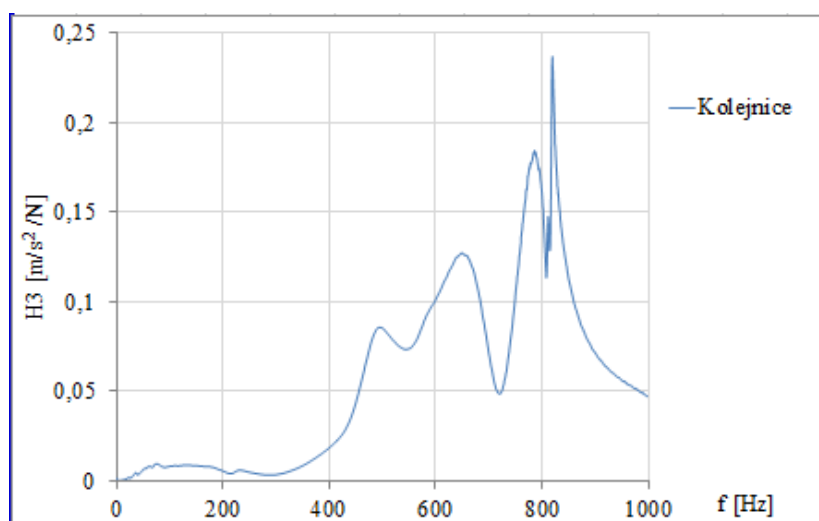


*Graf 4.2 H3 pro Pandrol FC I, buzení rázem*

Oproti tomu pro upevnění Pandrol FC I buzení elektrodynamickým budičem byly pro signál z kolejnice odečteny významné frekvence v prvním pásmu 80Hz, ve druhém 390Hz a ve třetím 560Hz, 610Hz-640Hz a 810Hz-830Hz (pro ilustraci Graf 4.3). Pro signál na pražci to byly pro první pásmo frekvence 90Hz, pro druhé frekvence 230Hz a 380Hz, pro pásmo třetí 530Hz-580Hz. Pro signál v kolejovém loži to byly pro první pásmo frekvence 80Hz a 110Hz, pro druhé pásmo 220Hz, 370Hz, 470Hz a pro třetí pásmo 710Hz-780Hz.



*Graf 4.3 Amplitudové spektrum pro Pandrol FC I, buzení elektrodynamickým budičem*

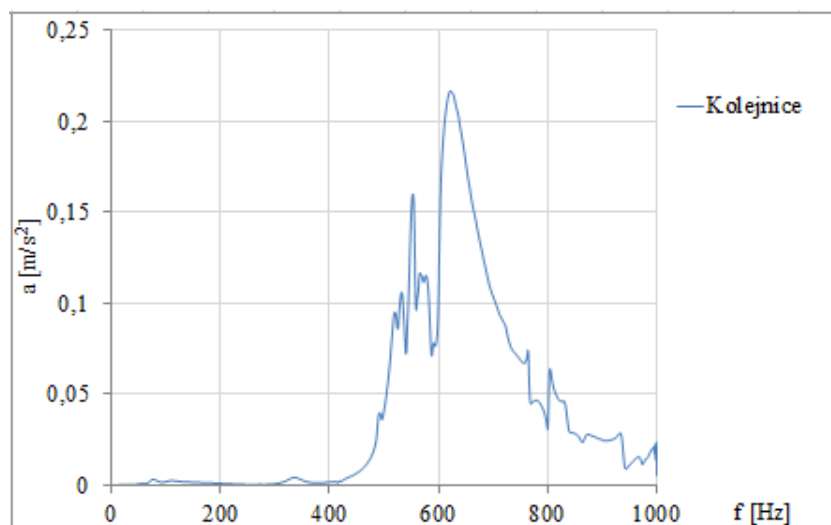


*Graf 4.4 H3 pro Vossloh W14, buzení rázem*

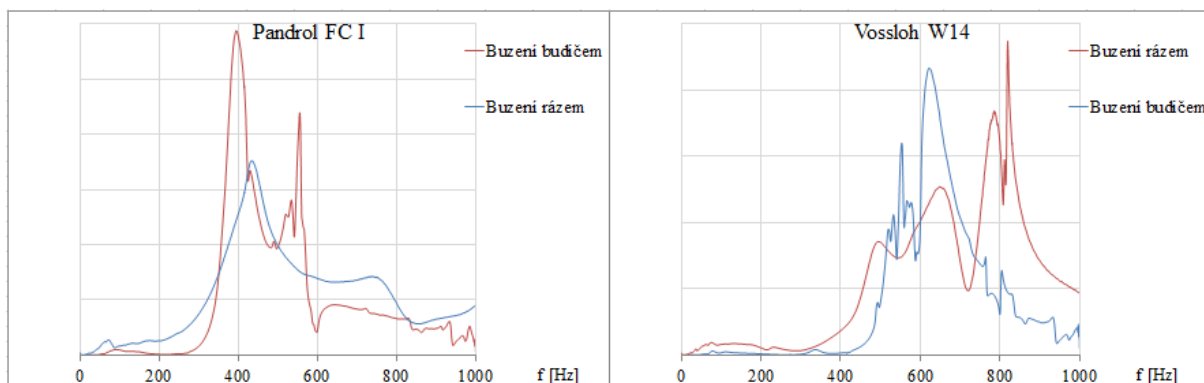
Pro upevnění Vossloh W14 byl také proveden významných frekvencí. Pro upevnění Vossloh W14 buzení rázem byly pro signál z kolejnice odečteny významné frekvence v prvním pásmu 70Hz, ve druhém 490Hz a ve třetím 650Hz, 780Hz s 820Hz (pro ilustraci Graf 4.4). Pro signál na pražci to byly pro první pásmo frekvence 80Hz, pro druhé frekvence 210Hz a pro pásmo třetí 630Hz, 780Hz a 820Hz. Pro signál v kolejovém loži to byly pro první pásmo frekvence 70Hz, pro druhé pásmo 220Hz a pro třetí pásmo 630Hz, 780Hz a 820Hz.

Oproti tomu pro upevnění Vossloh W14 buzení elektrodynamickým budičem byly pro signál z kolejnice odečteny významné frekvence v prvním pásmu 70Hz-90Hz, ve druhém 330Hz a ve třetím 530Hz, 630Hz a 810Hz (pro ilustraci Graf 4.5). Pro signál na pražci to byly

pro první pásmo frekvence 80Hz, pro druhé frekvence 150Hz a 490Hz, pro pásmo třetí 560Hz a 600Hz. Pro signál v kolejovém loži to byly pro první pásmo frekvence 80Hz, pro druhé pásmo 210Hz, 280Hz, 360Hz a pro třetí pásmo 520Hz a 620Hz.



Graf 4.5 Amplitudové spektrum pro Vossloh W14, buzení elektrodynamickým budičem



Graf 4.6 Prolnutí funkcí pro budič a ráz; srovnání významných frekvencí; kolejnice

Jak můžeme vidět z grafů a ze srovnání významných frekvencí porovnávané metody buzení se úplně neshodují (pro přehlednost prolnutí v grafu 4.6). V některých případech sice významné frekvence od buzení elektrodynamickým budičem kopírují ty od buzení rázem, ovšem shody není dosaženo vždy. Buzení elektrodynamickým budičem zvýrazňuje i frekvence, které při buzení rázem nenabývají takové důležitosti a naopak. Při prozkoumání ostatních upevnění (k detailnímu nahlédnutí v příloze B Srovnání způsobů buzení) však můžeme najít jistou podobnost. Při buzení elektrodynamickým budičem pozorujeme posun významných frekvencí směrem k počátku souřadného systému. Pro budoucí zkoumání této problematiky doporučuji nalézt příčinu tohoto posunu a způsob jeho eliminace, ať už při

samotném měření nebo při jeho následném vyhodnocení. Metody buzení na této úrovni shledávám jen částečně srovnatelnými pro ne vždy stejné chování v rámci významných frekvencí. Za srovnatelné je budu moct prohlásit až tehdy, budou-li významné frekvence naměřeny stejné nebo podobné s relativně malým posunem.

#### **4.1.2.2 Srovnání upevnění Pandrol FC I a Vossloh**

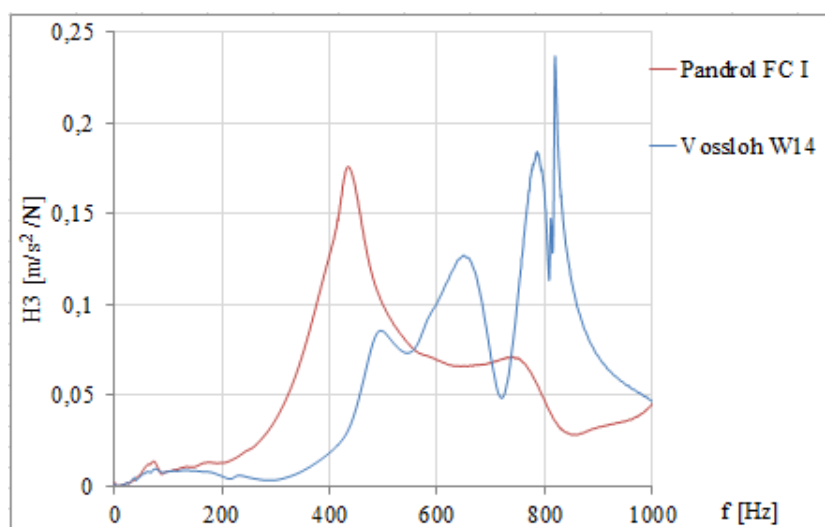
Při porovnávání typů upevnění jsem postupoval tak, že jsem Pandrol FC I jako jediného zástupce upevnění Pandrol bral jako referenční a porovnával jsem s ním ostatní upevnění typu Vossloh. Dále byly porovnány odhady frekvenčních odezvových funkcí H3 od buzení rázem, co do jejich průběhu v závislosti na hlavních frekvencích. Tyto významné frekvence byly rozděleny do pásem stejně jako v kapitole Srovnání způsobů buzení. Popis vyhodnocení ukáží opět na průbězích funkcí pro kolejnici. Porovnáním veškerých grafů odhadů odezvových funkcí se zabývá příloha C Srovnání typů upevnění.

Pro upevnění Pandrol FC I buzení rázem byly pro signál z kolejnice odečteny významné frekvence pro první pásmo 70Hz, pro druhé 160Hz a 400Hz a pro pásmo třetí 730Hz a 840Hz. Nejvyšší hodnota spektra FRF byla naměřena na frekvenci druhého pásma.

Nejblíže průběhem funkce H3, ve smyslu významných frekvencí a hodnot spektra FRF na těchto srovnatelných významných frekvencích, je upevnění Vossloh W21. Pro něj platí významné frekvence v prvním pásmu 50Hz, v druhém 290Hz a 400Hz a ve třetím pásmu 730Hz a 760Hz. Kde nejvyšší hodnota byla naměřena taktéž ve druhém pásmu na významné frekvenci 290Hz. Oproti upevnění Pandrol FC I je tedy patrný vývoj vibrací již na nižších frekvencích. Dále tam, kde u Pandrol FC I vzniká druhý nejdůležitější vrchol u Vossloh W21 dochází k výraznějšímu rozvoji vibrací.

Další typ upevnění, který má podobný průběh funkce H3 jako Pandrol FC I byl Vossloh E14. Pro něj platí významné frekvence v prvním pásmu 60Hz, v druhém 240Hz a 300Hz a ve třetím pásmu v intervalu 640Hz-670Hz. Maximální hodnota spektra FRF byla naměřena na frekvenci 240Hz, což je taktéž v druhém vyhodnocovaném pásmu. Na konci je viditelný nárůst a rozkmitání funkce H3, který ale vzhledem k ostatním upevněním typu Vossloh můžeme považovat spíše za chybu měření. Ne tak z hlediska měření samotného jako z hlediska vlivu okolních podmínek. Je zde vidět podobný posun více do druhého pásma jako u upevnění Vossloh W21.

Dále byly vyhodnoceny odvozené varianty systému upevnění Vossloh W14. Prvním vyhodnoceným bylo upevnění Vossloh W14. Pro něj platí významné frekvence v prvním pásmu 70Hz, ve druhém 490Hz a ve třetím 650Hz, 780Hz a 820Hz. Kde nejvyšší hodnota byla naměřena ve třetím pásmu na významné frekvenci 820Hz. V oblasti v okolí významné frekvence 780Hz, kde se u upevnění Pandrol FC I nachází jedna z významných frekvencí je vidět, že upevnění Pandrol FC I zde lépe redukuje šíření vibrací. Naopak je to ale v první půli frekvenčního pásma, kde jsou vibrace lépe redukovány u upevnění Vossloh W14. Ze srovnání vyplývá lepší schopnost upevnění Pandrol FC I zamezit vibracím v pásmu třetím, tedy pásmu, které má vliv na tvorbu hluku, zato upevnění Vossloh W14 v pásmu druhém. Srovnání pro ilustraci na Graf 4.7.



*Graf 4.7 Srovnání funkcí H3 pro Vossloh W14 a Pandrol FC I; kolejnice*

Předposledním hodnoceným upevněním bylo upevnění Vossloh W14 nové. Toto upevnění vykazuje podobné vlastnosti jako upevnění Vossloh W14 staré, ale navíc eliminuje další vývoj vibrací na jeho hlavních frekvencích. Platí pro něj významné frekvence v prvním pásmu 60Hz, ve druhém 490Hz a ve třetím 680Hz, 770Hz a 830Hz. Kde nejvyšší hodnota byla naměřena ve třetím pásmu na významné frekvenci 680Hz. Podrobné srovnání bude obsahem následující kapitoly 4.1.2.3 Srovnání nového a starého upevnění Vossloh W14.

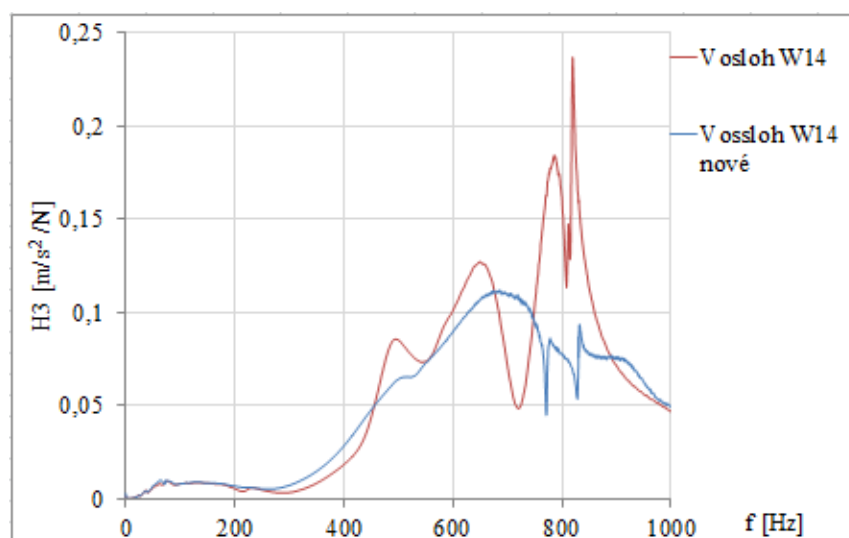
Posledním zkoušeným upevněním bylo upevnění Vossloh W14NT. Pro něj platí významné frekvence v prvním pásmu 60Hz, ve druhém nevznikají žádné významnější vrcholy a ve třetím pásmu 590Hz, 720Hz, 780Hz a 800Hz. Kde nejvyšší hodnota byla naměřena ve třetím pásmu na významné frekvenci 590Hz. Dochází k vývoji hlavních frekvencí až hluboko ve třetím pásmu zodpovědném za vibrace spojené s hlukem. Ovšem

upevnění W14 nové je tomto ohledu lepší. Bylo by tedy zajímavé srovnat změnu vlastností upevnění Vossloh W14NT v závislosti na stáří.

Průběhy podobných vlastností jsou i na ostatních funkcích H3 dalších součástí kolejového roštu. Detailní přehled je k nahlédnutí v příloze C Srovnání typů upevnění. Za zmínku stojí výrazně nižší hodnoty spektra na kolejovém loži pro upevnění Vossloh. Tento jev není na funkcích H3 čidel na pražci až tak patrný, ale vzhledem k stále stejnému průběhu a uspořádání zkoušky usuzují, že jde o pozitivní jev spojený s upevněními Vossloh.

Celkově tedy hodnotím upevnění Vossloh lépe a to konkrétně variantu Vossloh W14 nové. Vykazuje nižší hodnoty maxim spektra FRF, nedochází zde tolik ke vzniku vrcholů takové intenzity na významných frekvencích a celkově je průběh přenosové funkce plynulejší než u ostatních upevnění Vossloh. Snížení hodnot spektra je v případě všech upevnění poměrně stejné. Další vyhodnocení v závislosti na tlumení bude předmětem kapitoly 4.1.3 Vyhodnocení tlumení. V porovnání s ostatními upevněními lépe redukuje vznik vibrací ve všech třech pásmech.

#### 4.1.2.3 Srovnání upevnění Vossloh W14 nové a staré



Graf 4.8 Srovnání funkcí H3 pro Vossloh W14 nový a starý; kolejnice

Při srovnávání těchto dvou upevnění je již na první pohled patrné, že se v konstrukci nechovají totožně. Průběh v první polovině měřicího rozsahu je sice podobný, ne-li úplně



stejný, ale druhá polovina je už jiného průběhu. Tam, kde u starého upevnění dochází k velkému rozvoji vibrací, u nového dochází k víceméně plynulému snižování bez charakteristického vrcholu pro starý vzorek upevnění. Konkrétně na frekvenci 650Hz a hlavní vrchol na frekvenci 820Hz jak je vidět na ilustrativním srovnání funkcí  $H_3$  pro snímače na kolejnicích (Graf 4.8). Podrobné grafy jsou součástí přílohy D Srovnání upevnění Vossloh W14 nové a staré.

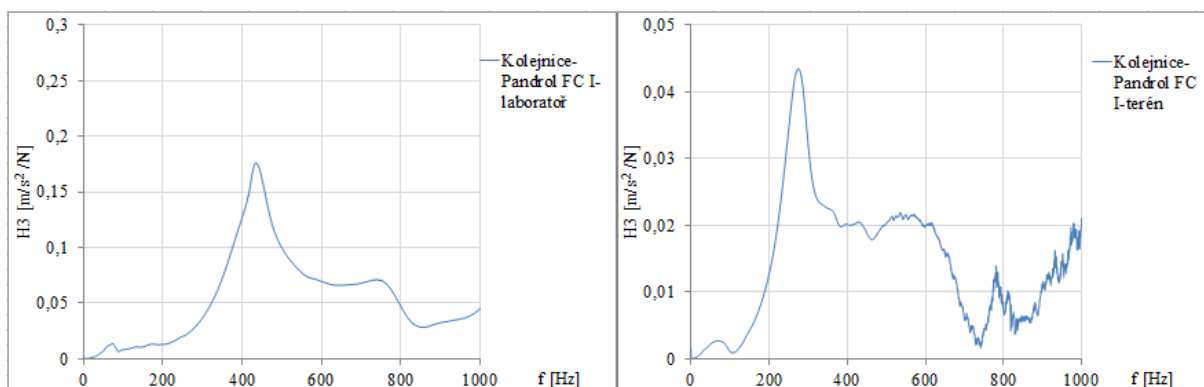
Je tedy vidět, že upevnění Vossloh W14 podléhá časem opotřebení a jeho schopnost snižovat vibrace záleží na jeho stavu. Nabízí se tedy možnost sledovat opotřebení upevnění jako celku touto metodou a usuzovat tak na její stav ve vztahu se schopností snižovat vibrace. Bohužel jsme v rámci práce nemohli otestovat vzorky degradované časem i u ostatních typů upevnění. Další analýza by již byla nad rámec možností bakalářské práce, ovšem odhalila by, jestli je možné brát tuto změnu průběhu přenosové funkce jako globálně opakující se jev pomocí kterého by se dal ověřovat stav upevnění na trati.

#### **4.1.2.4 Srovnání měření v laboratoři a v terénu**

Pro srovnání měření v terénu a v laboratorních podmínkách byly zvoleny upevnění Vossloh W14 a Pandrol FC I. Pandrol FC I jakožto jediný zástupce upevnění Pandrol a Vossloh W14 pro jeho široké rozšíření na našich tratích. V případě upevnění Vossloh jsem porovnával měření v terénu s výsledky měření na upevnění se starými komponenty. To proto, aby výsledky byly více podobné a lépe srovnatelné s měřením na trati. Opět detailně srovnám signál z čidla na kolejnici. Zbývá srovnání jsou součástí přílohy E Srovnání měření v laboratoři a v terénu.

Pro Pandrol FC I, měření v terénu, byly významné frekvence naměřeny v prvním pásmu 60Hz, ve druhém 270Hz a 420Hz, ve třetím 500Hz-570Hz a 760Hz-840Hz. Kde nejvyšší hodnota byla naměřena ve druhém pásmu na významné frekvenci 270Hz.

Pro Vossloh W14, měření v terénu, byly významné frekvence naměřeny v prvním pásmu 100Hz, ve druhém nebyly nijak výrazné a ve třetím byly naměřeny 590Hz a 760Hz. Kde nejvyšší hodnota byla naměřena ve třetím pásmu na významné frekvenci 760Hz.

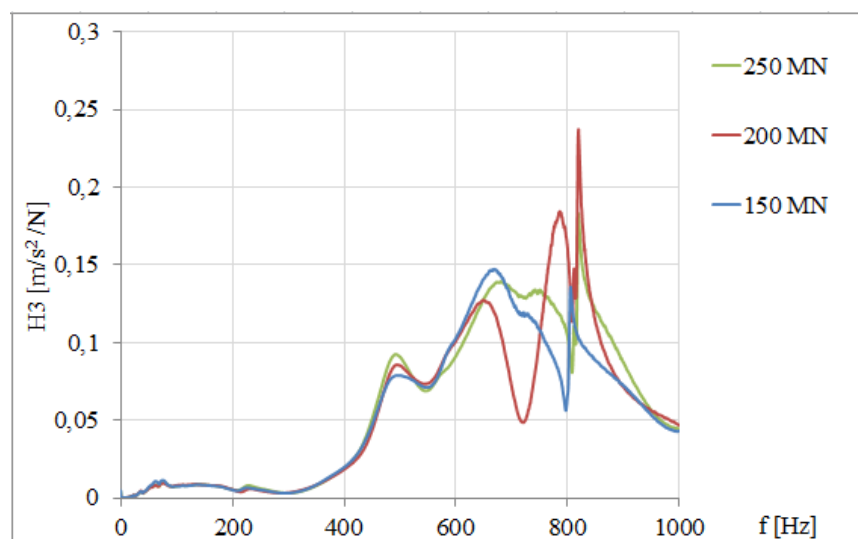


*Graf 4.9 Srovnání měření v laboratoři a v terénu*

Z odhadů frekvenční odezvy funkce  $H_3$  je vidět přesun hlavních frekvencí směrem k počátku soustavy souřadnic. Toto může být způsobeno tím, že kolejový rošt jako celek je časem degradován a již není v původním stavu. Svou roli může hrát také stav dotažení (při upevnění Vossloh W14) o čemž se přesvědčíme v další kapitole. Tento posun je patrný na všech srovnávaných funkcích, jak je patrné v příloze E Srovnání měření v laboratoři a v terénu a na ilustračním obrázku, reprezentujícím snímáče na kolejnici pro upevnění Pandrol FC I (Graf 4.9).

Ze srovnání buzení v laboratoři a v terénu tedy vyplývá, že se nám nepovedlo úplně přesně simulovat vlastnosti trati v laboratorních podmínkách. Tato simulace je ovšem velice komplikovaná vzhledem k množství parametrů ovlivňující konstrukci na trati. Vzhledem ke zjištění velice podobných významných frekvencí, ale usuzuji na velice podobné chování. Jejich posun by se při budoucím použití mohl pozorovat na více vzorcích a mohl by se tak zohlednit při vyhodnocování.

#### 4.1.2.5 Vliv stavu dotažení



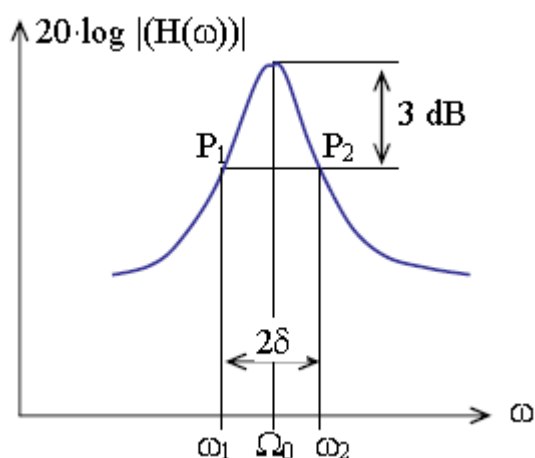
*Graf 4.10 Srovnání utažení; Vossloh W14; kolejnice*

Na upevněních typu Vossloh bylo provedeno doplňkové měření vlivu dotažení. Toto měření mělo dát možnost poznat podle průběhu odhadů frekvenčních odezvových funkcí  $H_3$  míru dotažení. Bohužel se tato skutečnost nijak výrazně na těchto funkcích neprojeví. Hlavní frekvence zůstávají více či méně stejné. Snad jen u upevnění zkoušených také v terénu a to Pandrol FC I a Vossloh W14 se projevil posun hlavních frekvencí resp. celé křivky směrem k počátku souřadného systému. U dalších upevnění se tento jev opakoval jen v některých případech, takže nemůžeme s jistotou říct, že je to pravidlem. Nemohu tedy na základě tohoto výzkumu usuzovat na změny průběhu funkcí v závislosti na dotažení či nedotažení. Do budoucna navrhuji provést rozsáhlejší analýzu na dokonalejším modelu, který bude lépe napodobovat chování reálné konstrukce. Z vyhodnocení této části práce vyplývá pouze to, že máme-li odhad frekvenční odezvové funkce pro předpisové dotažení, můžeme po vyhodnocení měření odhadnout, zdali upevnění není vzorově dotaženo, ne však jestli bylo přetaženo nebo nedotaženo (Graf 4.10). Přehled veškerých přenosových funkcí je obsahem přílohy F Vliv stavu dotažení.

#### 4.1.3 Vyhodnocení tlumení

Součástí mé bakalářské práce bylo také vyhodnocení tlumení. Tato část byla opět zpracována pomocí programu ME'Scope. Do programu bylo potřeba nejdříve nahrát průběhy měření ve formě odhadů frekvenční odezvové funkce  $H_3$ , při buzení rázem, nebo

amplitudových spekter při buzení elektrodynamickým budičem. Poté byly pro každou variantu vyhodnoceny důležité vrcholy, taktéž pomocí tohoto programu. Z těchto softwarově vybraných jsem vybral ty na nejdůležitějších frekvencích. Pro tyto vrcholy pak byly vytvořeny tabulky hodnot tlumení (přehledně uspořádány v příloze G Tlumení). Tabulky zobrazují frekvence, na kterých se nachází vrcholy, a příslušné hodnoty tlumení v procentech. To vše pro jednotlivé druhy buzení a také pro každé upevnění. Tyto hodnoty byly rozděleny do tří pásem, navazují tak na frekvenční analýzu (Kap. 4.1.2). Následně byly odpovídající se frekvence v rámci pásem porovnány a bylo zjištěno, které upevnění má lepší hodnoty tlumení pro různé situace.



Obr. 4.1 Vyhodnocení tlumení z 3dB pásma

Odečet tlumení funguje v programu ME'Scope na principu určení tlumení pomocí bodů s polovičním výkonem (Obr. 4.1). Body s polovičním výkonem jsou body grafu amplitudy, kde amplituda poklesne na  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  své špičkové hodnoty. Poloviční se jim říká podle toho, že pokud by byl graf amplitudy  $H(\omega)$  vyobrazen ve výkonovém spektru, byly by to body s  $\frac{1}{2}$  hodnotou oproti hodnotě špičkové. Program ME'Scope umožňuje zobrazit přenosové funkce v logaritmickém měřítku os souřadnic. Body polovičního výkonu jsou pak v místech, kde hodnota poklesne oproti vrcholu amplitudy o 3dB:

$$\frac{H_{\text{res}}}{H_{\text{halfpower}}} = \sqrt{2}$$

$$20 \cdot \log H_{\text{res}} - 20 \cdot \log H_{\text{halfpower}} = 20 \cdot \log \sqrt{2} = 3$$

$$H_{\text{res}} - H_{\text{halfpower}} = 3\text{dB}$$

Kde  $H_{\text{res}}$  je špičková hodnota a  $H_{\text{halfpower}}$  hodnota poloviční. Po označení bodů  $P_1$  a  $P_2$  a jim příslušných frekvencí  $\omega_1$  a  $\omega_2$ , dostaneme rozdíl frekvencí  $\omega_2 - \omega_1$ , který se nazývá 3dB pásmo systému. Pro malé tlumení dále platí:

$$\Delta\omega_{3\text{dB}} = \omega_2 - \omega_1 = 2 \cdot \zeta \cdot \Omega_0$$

kde  $\Delta\omega_{3\text{dB}}$  je 3dB pásmo. Po úpravách se dostáváme ke vztahu:

$$\frac{\omega_2 - \omega_1}{\Omega_0} = 2\zeta \quad (4.1)$$

Takto tedy bylo možné poměrně pohodlně získat data pro tabulky. Tabulky byly kompletovány v tabulkovém procesoru a jsou součástí přílohy G Tlumení.

### **Srovnání tlumení upevnění Pandrol FC I a Vossloh při buzení rázem**

Pro srovnání tlumení těchto typů upevnění, pro buzení rázem, byly vypracovány tři tabulky, každá odpovídající jednomu pásmu. Tyto tabulky navazují na tabulky G.1- G.6 z přílohy G Tlumení. Porovnávají hodnoty útlumů na srovnatelných hodnotách frekvencí, vždy pro jedno frekvenční pásmo. V tabulkách v příloze G je pro přesnost, vždy v tučném rámečku, uvedena hodnota použitá pro srovnání. V první tabulce (Tab. 4.1) bylo srovnáno pásmo 0-80 Hz, které je významné z hlediska vlivu vozidel na konstrukci. Hodnoty nad sebou znamenají postupně shora typ upevnění, který dosahuje na porovnávané frekvenci vyšší hodnoty tlumení pro části konstrukce: kolejnice, pražec a kolejové lože. Pro toto pásmo se frekvence pohybovali okolo 60Hz-70Hz. Z tabulky vyplývá, že upevněním s nejvyšším tlumením na kolejnici je upevnění Vossloh W14NT, na pražci je to upevnění Vossloh W21 a nejlepších hodnot tlumení v kolejovém loži dosáhlo upevnění Vossloh E14. Při porovnání všech hodnot tlumení bylo jako poměrně nejvíce tlumící upevnění Vossloh W14 s novými komponenty.

Tab. 4.1 Vyhodnocení tlumení upevnění; buzení rázem; pásmo 0Hz-80Hz

	Pandrol FC I	Vossloh W14	Vossloh W14 (nové)	Vossloh W21	Vossloh E14	Vossloh W14NT
Pandrol FC I		P	P	P	P	W14NT
		W14	W14nové	W21	E14	P
		P	W14nové	P	E14	P
Vossloh W14	P		W14nové	W21	W14	W14NT
	W14		W14	W21	W14	W14
	P		W14nové	W14	E14	W14NT
Vossloh W14 (nové)	P	W14nové		W14nové	W14nové	W14NT
	W14nové	W14		W21	W14nové	W14nové
	W14nové	W14nové		W14nové	E14	W14nové
Vossloh W21	P	W21	W14nové		W21	W14NT
	W21	W21	W21		W21	W21
	P	W14	W14nové		E14	W14NT
Vossloh E14	P	W14	W14nové	W21		W14NT
	E14	W14	W14nové	W21		E14
	E14	E14	E14	E14		E15
Vossloh W14NT	W14NT	W14NT	W14NT	W14NT	W14NT	
	P	W14	W14nové	W21	E14	
	P	W14NT	W14nové	W14NT	E14	

Pořadí upevnění z hlediska tlumení

Kolejnice	2.	5.	3.	4.	6.	1.
Pražec	5.	2.	3.	1.	4.	6.
Kolejové lože	3.	5.	2.	6.	1.	4.
Celkové pořadí	2.	4.	1.	3.	3.	3.

V druhé tabulce (Tab. 4.2) bylo srovnáno pásmo 80Hz-400Hz, které je významné z hlediska vlivu imperfekcí jízdní dráhy. Hodnoty nad sebou opět znamenají postupně shora typ upevnění, který dosahuje na porovnávané frekvenci vyšší hodnoty tlumení pro části konstrukce: kolejnice, pražec a kolejové lože. Pro toto pásmo se frekvence pohybovali okolo 120Hz-140Hz pro měření na kolejnici, 110Hz-130Hz pro měření na pražci a 220Hz-240Hz pro měření v kolejovém loži. Z tabulky vyplývá, že upevnění s nejvyšším tlumením na kolejnici jsou upevnění Vossloh W14NT a Vossloh W21, na pražci je to upevnění Vossloh W21 a nejlepších hodnot tlumení v kolejovém loži dosáhlo upevnění Vossloh E14. Při porovnání všech hodnot tlumení bylo jako poměrně nejvíce tlumící upevnění Vossloh W21

Tab. 4.2 Vyhodnocení tlumení upevnění; buzení rázem;pásmo 80Hz-400Hz

	Pandrol FC I	Vossloh W14	Vossloh W14 (nové)	Vossloh W21	Vossloh E14	Vossloh W14NT
Pandrol FC I		W14	W14nové	W21	E14	W14NT
		W14	W14nové	W21	E14	W14NT
		W14	P	W21	E14	W14NT
Vossloh W14	W14		W14	W21	E14	W14NT
	W14		W14	W21	W14	W14
	W14		W14	W21	E14	W14
Vossloh W14 (nové)	W14nové	W14		W14nové	E14	W14NT
	W14nové	W14		W21	W14nové	W14nové
	P	W14		W21	E14	W14NT
Vossloh W21	W21	W21	W14nové		W21	W21
	W21	W21	W21		W21	W21
	W21	W21	W21		E14	W14NT
Vossloh E14	E14	E14	E14	W21		W14NT
	E14	W14	W14nové	W21		W14NT
	E14	E14	E14	E14		E14
Vossloh W14NT	W14NT	W14NT	W14NT	W21	W14NT	
	W14NT	W14	W14nové	W21	W14NT	
	W14NT	W14	W14NT	W14NT	E14	

Pořadí upevnění z hlediska tlumení

Kolejnice	4.	3.	3.	1.	2.	1.
Pražec	6.	2.	3.	1.	5.	4.
Kolejové lože	3.	2.	4.	2.	1.	2.
Celkové pořadí	5.	3.	4.	1.	3.	2.

V třetí tabulce (Tab. 4.3) bylo srovnáno pásmo 400-1000Hz, které je významné z hlediska hluku. Hodnoty nad sebou opět znamenají postupně shora typ upevnění, který dosahuje na porovnávané frekvenci vyšší hodnoty tlumení pro části konstrukce: kolejnice, pražec a kolejové lože. Pro toto pásmo se frekvence pohybovali okolo 760Hz-780Hz pro měření na kolejnici, okolo 800Hz pro měření na pražci a 690Hz-710Hz pro měření v kolejovém loži. Z tabulky vyplývá, že upevnění s nejvyšším tlumením na kolejnici je upevnění Vossloh W14, na pražci je to taktéž upevnění Vossloh W14 a nejlepších hodnot tlumení v kolejovém loži dosáhla upevnění Pandrol FC I, Vossloh W14 a Vossloh W21. Při porovnání všech hodnot tlumení bylo jako poměrně nejvíce tlumící upevnění Vossloh W14.

Tab. 4.3 Vyhodnocení tlumení upevnění; buzení rázem; pásma 400Hz-1000Hz

	Pandrol FC I	Vossloh W14	Vossloh W14 (nové)	Vossloh W21	Vossloh E14	Vossloh W14NT
Pandrol FC I		W14	W14nové	P	P	W14NT
		W14	W14nové	W21	P	W14NT
		P	P	W21	P	P
Vossloh W14	W14		W14	W14	W14	W14
	W14		W14	W14	W14	W14
	P		W14	W14	W14	W14
Vossloh W14 (nové)	W14nové	W14		W14nové	W14nové	W14nové
	W14nové	W14		W21	W14nové	W14NT
	P	W14		W21	W14nové	W14nové
Vossloh W21	P	W14	W14nové		W21	W14NT
	W21	W14	W21		W21	W21
	W21	W14	W21		W21	W21
Vossloh E14	P	W14	W14nové	W21		W14NT
	P	W14	W14nové	W21		W14NT
	P	W14	W14nové	W21		W14NT
Vossloh W14NT	W14NT	W14	W14nové	W14NT	W14NT	
	W14NT	W14	W14NT	W21	W14NT	
	P	W14	W14nové	W21	W14NT	

Pořadí upevnění z hlediska tlumení

Kolejnice	4.	1.	2.	5.	6.	3.
Pražec	5.	1.	4.	2.	6.	3.
Kolejové lože	1.	1.	2.	1.	4.	3.
Celkové pořadí	4.	1.	3.	2.	5.	4.

Při závěrečném srovnání napříč všemi třemi pásmy jsem došel k závěru, že všeobecně nejvíce tlumícím je upevnění Vossloh W14 následované, podle tlumení sestupně, upevněními Vossloh W21, Vossloh W14NT, Vossloh W14 s novými součástmi a na posledním místě upevněními Pandrol FC I a Vossloh E14. Můžu tedy konstatovat, že obecně vyšla upevnění Vossloh s větší hodnotou tlumení oproti upevnění Pandrol FC I. Ve mnou sestavených tabulkách je jednoduše vidět, které upevnění lépe tlumí jakou oblast frekvenčního rozsahu. Mohou tedy být nápomocné při návrhu změny upevnění na základě potřebného tlumení.



## Srovnání tlumení upevnění Pandrol FC I a Vossloh při buzení elektrodynamickým budičem

Pro srovnání tlumení těchto typů upevnění, tentokrát pro buzení elektrodynamickým budičem, byly vypracovány tři tabulky, každá odpovídající jednomu pásmu. Tyto tabulky navazují na tabulky G.9-G.14 z přílohy G Tlumení. Porovnávají hodnoty útlumů na srovnatelných hodnotách frekvencí, vždy pro jedno frekvenční pásmo. V tabulkách v příloze G je pro přesnost, vždy v tučném rámečku, uvedena hodnota použitá pro srovnání.

*Tab. 4.4 Vyhodnocení tlumení upevnění; buzení elektrodynamickým budičem;pásmo 0Hz-80Hz*

	Pandrol FC I	Vossloh W14	Vossloh W14 (nové)	Vossloh W21	Vossloh E14	Vossloh W14NT
Pandrol FC I		P	P	P	P	
		P	W14nové	W21	P	P
Vossloh W14	P		W14nové	W21	W14	
	P		W14nové	W21	W14	W14
Vossloh W14 (nové)	P	W14nové		W14nové	W14nové	
	W14nové	W14nové		W14nové	W14nové	W14nové
Vossloh W21	P	W21	W14nové		W21	
	W21	W21	W14nové		W21	W21
Vossloh E14	P	W14	W14nové	W21		
	P	W14	W14nové	W21		E14
Vossloh W14NT						
	P	W14	W14nové	W21	E14	

Pořadí upevnění z hlediska tlumení

Kolejnice						
Pražec	1.	4.	2.	3.	5.	
Kolejové lože	3.	4.	1.	2.	5.	6.
Celkové pořadí	2.	4.	1.	3.	5.	6.

V první tabulce (Tab. 4.4) bylo srovnáno pásmo 0Hz-80 Hz, které je významné z hlediska vlivu vozidel na konstrukci. Hodnoty nad sebou znamenají postupně shora typ upevnění, který dosahuje na porovnávané frekvenci vyšší hodnoty tlumení pro části

konstrukce: kolejnice, pražec a kolejové lože. Pro toto pásmo se frekvence pohybovali okolo 60Hz-80Hz. Místa v tabulce označená křížkem znamenají, že tlumení na dané frekvenci vhodné pro srovnání nebylo možné odečíst. Z tabulky vyplývá, že na kolejnici nebylo možné pro toto pásmo odečíst a srovnat hodnoty tlumení. Na pražci už ano, pro ten je nejlépe tlumícím upevněním upevnění Pandrol FC I. Nejvyšších hodnot tlumení v kolejovém loži dosáhlo upevnění Vossloh W14 s novými komponenty. Při porovnání všech hodnot tlumení bylo jako poměrně nejvíce tlumící upevnění Vossloh W14 s novými komponenty.

Tab. 4.5 Vyhodnocení tlumení upevnění; buzení elektrodynamickým budičem; pásmo 80Hz-400Hz

	Pandrol FC I	Vossloh W14	Vossloh W14 (nové)	Vossloh W21	Vossloh E14	Vossloh W14NT
Pandrol FC I				W21	P	
			P	P	P	
		W14	W14nové	W21	P	W14NT
Vossloh W14						
	W14		W14	W21	W14	W14NT
Vossloh W14 (nové)						
	P			W21	E14	
	W14nové	W14		W21	W14nové	W14NT
Vossloh W21	W21				W21	
	P		W21		W21	
	W21	W21	W21		E14	W14NT
Vossloh E14	P			W21		
	P		E14	W21		
	P	W14	W14nové	E14		E14
Vossloh W14NT						
	W14NT	W14NT	W14NT	W14NT	E14	

Pořadí upevnění z hlediska tlumení

Kolejnice	2.			1.	3.	
Pražec	1.		4.	2.	3.	
Kolejové lože	4.	2.	3.	2.	3.	1.
Celkové pořadí	2.	4.	5.	1.	4.	3.

V druhé tabulce (Tab. 4.5) bylo srovnáno pásmo 80Hz-400Hz, které je významné z hlediska vlivu imperfekcí jízdní dráhy. Hodnoty nad sebou opět znamenají postupně shora typ upevnění, který dosahuje na porovnávané frekvenci vyšší hodnoty tlumení pro části

konstrukce: kolejnice, pražec a kolejové lože. Pro toto pásmo se frekvence pohybovali okolo 400Hz-430Hz pro měření na kolejnici, 130Hz-160Hz pro měření na pražci a 270Hz-290Hz pro měření v kolejovém loži. V tabulce opět vidíme některá místa značená křížkem, jde opět o místa bez možnosti odečíst hodnotu tlumení nebo o místa kde nebyly srovnatelné frekvence. Z tabulky vyplývá, že upevnění s nejvyšším tlumením na kolejnici, z těch co bylo možno vyhodnotit, je upevnění Vossloh W21 pro kolejnici, na pražci je to pak upevnění Pandrol FC I a nejvyšších hodnot tlumení v kolejovém loži dosáhlo upevnění Vossloh W14NT. Při porovnání všech hodnot tlumení bylo jako poměrně nejvíce tlumící upevnění Vossloh W21. Tuto hodnotu ovšem musíme brát s rezervou z důvodu nemožnosti vyhodnotit upevnění ve všech pásmech.

Tab. 4.6 Vyhodnocení tlumení upevnění; buzení elektrodynamickým budičem;pásmo 400Hz-1000Hz

	Pandrol FC I	Vossloh W14	Vossloh W14 (nové)	Vossloh W21	Vossloh E14	Vossloh W14NT
Pandrol FC I		W14	W14nové	W21	P	P
		P	W14nové	P	P	W14NT
		W14	W14nové	W21	P	W14NT
Vossloh W14	W14		W14	W14	W14	W14
	P		W14nové	W14	W14	W14NT
	W14		W14	W14	W14	W14
Vossloh W14 (nové)	W14nové	W14		W21	W14nové	W14nové
	W14nové	W14nové		W14nové	W14nové	W14NT
	W14nové	W14		W14nové	W14nové	W14NT
Vossloh W21	W21	W14	W21		W21	W21
	P	W14	W14nové		W14	W14NT
	W21	W14	W14nové		W21	W14NT
Vossloh E14	P	W14	W14nové	W21		W14NT
	P	W14	W14nové	W14		W14NT
	P	W14	W14nové	W21		W14NT
Vossloh W14NT	P	W14	W14nové	W21	W14NT	
	W14NT	W14NT	W14NT	W14NT	W14NT	
	W14NT	W14	W14NT	W14NT	W14NT	

Pořadí upevnění z hlediska tlumení

Kolejnice	4.	1.	3.	2.	6.	5.
Pražec	3.	4.	2.	5.	5.	1.
Kolejové lože	5.	1.	3.	4.	6.	2.
Celkové pořadí	3.	1.	2.	3.	4.	2.

V třetí tabulce (Tab. 4.6) bylo srovnáno pásmo 400Hz-1000Hz, které je významné z hlediska hluku. Hodnoty nad sebou opět znamenají postupně shora typ upevnění, který dosahuje na porovnávané frekvenci vyšší hodnoty tlumení pro části konstrukce: kolejnice, pražec a kolejové lože. Pro toto pásmo se frekvence pohybovali okolo 560Hz-620Hz pro měření na kolejnici, okolo 580Hz-620Hz pro měření na pražci a 450Hz-550Hz pro měření v kolejovém loži. Z tabulky vyplývá, že upevnění s nejvyšším tlumením na kolejnici je upevnění Vossloh W14, na pražci je to upevnění Vossloh W14NT a nejvyšších hodnot tlumení v kolejovém loži dosáhl Vossloh W14. Při porovnání všech hodnot tlumení bylo jako poměrně nejvíce tlumící upevnění Vossloh W14.

Provedl jsem opět srovnání napříč všemi pásmy a došel jsem k závěru, že všeobecně nejvíce tlumícím je upevnění Vossloh W14 s novými komponenty následované, podle tlumení sestupně, upevněními Vossloh W21 dále na stejné úrovni upevněními Vossloh W14 a Pandrol FC I, dále Vossloh W14NT a na posledním místě upevněním Vossloh E14. Bohužel nebylo možné odečíst všechny hodnoty tlumení. Pro budoucí použití jsou tedy tabulky nekompletní a bylo by vhodné je doplnit.

### Srovnání tlumení upevnění Vossloh W14 nové a staré

Srovnání tlumení starého a nového upevnění Vossloh W14 bylo provedeno na základě měření buzení soustavy rázem, stejně jako při rozboru dat ve frekvenční rovině. Tabulky (Tab. 4.7-4.9), které jsem sestavil pro srovnání, jsou vlastně výřezy tabulek 4.1-4.3, ve kterých srovnávám všechna upevnění. Opět tedy ukazují, která upevnění, pro kterou část konstrukce vykazují vyšší tlumení.

*Tab. 4.7 Srovnání tlumení upevnění Vossloh W14 nové a staré; pásmo 0Hz-80Hz*

	Vossloh W14	snímač
Vossloh W14 (nové)	W14nové	kolejnice
	W14	pražec
	W14nové	kolejové lože

*Tab. 4.8 Srovnání tlumení upevnění Vossloh W14 nové a staré; pásmo 80Hz-400Hz*

	Vossloh W14	snímač
Vossloh W14 (nové)	W14	kolejnice
	W14	pražec
	W14	kolejové lože

*Tab. 4.9 Srovnání tlumení upevnění Vossloh W14 nové a staré; pásmo 400Hz-1000Hz*

	Vossloh W14	snímač
Vossloh W14 (nové)	W14	kolejnice
	W14	pražec
	W14	kolejové lože

Z tabulky vyplývá, že vyššího tlumení dosahuje upevnění Vossloh W14 se starými součástmi a to v pásmech 80Hz-400Hz a 400Hz-1000Hz, naopak pro tlumení na nižších frekvencích 0Hz-80Hz se jeví jako lepší upevnění s novými součástmi. Při srovnání s frekvenční analýzou, kde pro Vossloh W14 s novými součástmi nevzniká vrchol na významných frekvencích jako u upevnění se starými součástmi, nemůžeme tedy ani odečíst vyšší hodnoty tlumení.

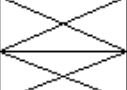


### **Srovnání tlumení v laboratoři a v terénu**

Pro toto srovnání tlumení jsem stejně jako pro ostatní sestavil skupinu tabulek (Tab. 4.10-4.15) přehledně ukazující, kdy tlumení nabývá vyšších hodnot. Jestli pro měření v laboratoři nebo pro měření v terénu. Tabulky jsou rozděleny podle jednotlivých frekvenčních pásem, v kterých byla vyhodnocována i frekvenční analýza.

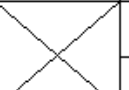

*Tab. 4.10 Srovnání tlumení v laboratoři a v terénu; pásmo 0Hz-80Hz*

	Pandrol FC I	Vossloh W14	
Pandrol FC I	terén		kolejnice
	laboratoř		pražec
Vossloh W14			kolejnice
			pražec

Tab. 4.11 Srovnání tlumení v laboratoři a v terénu; pásmo 80Hz-400Hz

	Pandrol FC I	Vossloh W14	
Pandrol FC I			kolejnice
			pražec
Vossloh W14		laboratoř	kolejnice
			pražec

Tab. 4.12 Srovnání tlumení v laboratoři a v terénu; pásmo 400Hz-1000Hz

	Pandrol FC I	Vossloh W14	
Pandrol FC I	terén		kolejnice
	terén		pražec
Vossloh W14		terén	kolejnice
		laboratoř	pražec

Pro toto měření uvádím detailní výpis frekvencí a tlumení na nich, podle toho jsem odvodil, zdali je možné srovnat model v laboratoři s opravdovou konstrukcí.

Pro upevnění Pandrol FC I v pásmu 0Hz-80Hz pro měření v laboratoři byly naměřeny tyto frekvence a tlumení na nich: 69Hz a tlumení 3,01% pro kolejnici a 73Hz s tlumení 3,95%.

Pro upevnění Pandrol FC I v pásmu 0Hz-80Hz pro měření v terénu byly naměřeny tyto frekvence a tlumení na nich: 83Hz a tlumení 3,25% pro kolejnici a 64Hz s tlumením 2,09%.

Pro upevnění Vossloh W14 v pásmu 0Hz-80Hz pro měření v terénu nebylo možné odečíst tlumení, nemohu tedy pro toto pásmo provést srovnání.

Pro upevnění Pandrol FC I v pásmu 80Hz-400Hz nebylo možné provést srovnání z důvodu velkého rozdílu hodnocených frekvencí tlumení. Toto srovnání by nebylo přesné.

Pro upevnění Vossloh W14 v pásmu 80Hz-400Hz pro měření v laboratoři byly naměřeny tyto frekvence a tlumení na nich: 114Hz a tlumení 2,99% pro kolejnici a 117Hz s tlumení 6,37%.

Pro upevnění Vossloh W14 v pásmu 80Hz-400Hz pro měření v terénu byly naměřeny tyto frekvence a tlumení na nich: 119Hz a tlumení 1,02% pro kolejnici a 149Hz s tlumením 6,149%.

Pro upevnění Pandrol FC I v pásmu 400Hz-1000Hz pro měření v laboratoři byly naměřeny tyto frekvence a tlumení na nich: 701Hz a tlumení 0,10% pro kolejnici a 874Hz s tlumením 0,06%.

Pro upevnění Pandrol FC I v pásmu 400Hz-1000Hz pro měření v terénu byly naměřeny tyto frekvence a tlumení na nich: 774Hz a tlumení 0,53% pro kolejnici a 798Hz s tlumením 0,08%.

Pro upevnění Vossloh W14 v pásmu 400Hz-1000Hz pro měření v laboratoři byly naměřeny tyto frekvence a tlumení na nich: 780Hz a tlumení 0,33% pro kolejnici a 818Hz s tlumením 0,31%.

Pro upevnění Vossloh W14 v pásmu 400Hz-1000Hz pro měření v terénu byly naměřeny tyto frekvence a tlumení na nich: 780Hz a tlumení 0,99% pro kolejnici a 803Hz s tlumením 0,02%.

Tento detailní výpis jsem provedl proto, abych dokázal, že změna tlumení je na porovnávaných frekvencích velice malá. Usuzuji tedy na velmi podobné chování konstrukce v terénu a v laboratoři. Považuji tedy vytvořený model za uspokojivý. I přesto doporučuji provést další řadu měření na větším vzorku upevnění v terénu, pro zpřesnění a potvrzení tohoto odhadu.

## 5 ZÁVĚR

Závěrem bych rád shrnul dílčí výsledky a doporučil další postup řešení problematiky týkající se této bakalářské práce. Z analýzy dat ve frekvenční oblasti, která byla vybrána jako stěžejní pro tuto práci, vyplývá, že významné frekvence se pro různé typy buzení neshodují. Ač se některé hlavní frekvence přibližují hlavním frekvencím při buzení rázem, shody není dosaženo vždy. Při buzení elektrodynamickým budičem jsou zvýrazněny funkce, které nejsou pro buzení rázem stěžejní a naopak. I přes to je při podrobnějším srovnání chování různých kombinací kolejového roštu vidět jedna společná vlastnost při buzení elektrodynamickým budičem. Je viditelný posun významných frekvencí směrem k počátku souřadného systému. Pro budoucí zkoumání této problematiky doporučuji nalézt příčinu tohoto posunu a způsob jeho eliminace, ať už při samotném měření nebo při jeho následném vyhodnocení. Metody buzení na této úrovni shledávám jen částečně srovnatelnými pro ne vždy stejné chování v rámci významných frekvencí. Za srovnatelné je budu moct prohlásit až tehdy, budou-li významné frekvence naměřeny stejné nebo podobné s relativně malým posunem.

V dalším srovnání bylo cílem porovnat různé typy upevnění Vossloh s upevněním Pandrol FC I. Celkově dopadlo nejlépe z hlediska hodnot spektra FRF na hlavních frekvencích upevnění Vossloh W14 s novými komponenty.

Při srovnání upevnění Vossloh W14 s novými a starými komponenty se potvrdil předpoklad, že upevnění a jeho součástí se časem zhoršují vlastnosti. Nabízí se tedy možnost sledovat opotřebení upevnění jako celku touto metodou a usuzovat tak na její stav ve vztahu na schopnost snižovat vibrace. Bohužel jsme v rámci práce nemohli otestovat vzorky degradované časem i u ostatních typů upevnění. Další analýza by již byla nad rámec možností bakalářské práce, ovšem odhalila by, jestli je možné brát tuto změnu průběhu přenosové funkce jako globálně opakující se jev pomocí kterého by se dal ověřovat stav upevnění na trati.

Ze srovnání zkoušek v laboratoři a v terénu vyplývá, že se nám nepovedlo úplně přesně simulovat vlastnosti trati v laboratorních podmínkách. Tato simulace je ovšem velice komplikovaná vzhledem k množství parametrů ovlivňující konstrukci na trati. Vzhledem ke zjištění velice podobných významných frekvencí, ale usuzuji na velice podobné chování. Stejně jako při srovnání způsobů buzení se zde projevil posun směrem k počátku soustavy



souřadnic. Tento posun by se při budoucím použití mohl pozorovat na více vzorcích a mohl by se tak zohlednit při vyhodnocování.

Posouzení vlivu dotažení je z přenosových funkcí patrné pouze částečně. Můžeme pouze stanovit, jestli bylo dané upevnění odchýleno od předpisového stavu, ne už jakého smyslu byla tato odchylka. Například pro upevnění Vossloh W14 z měření v terénu můžeme vzhledem k průběhu přenosové funkce, pro měření v laboratoři za předpisového dotažení, usuzovat na nepředpisové utažení tohoto upevnění.

Při odečtu tlumení bylo jako všeobecně nejvíce tlumící upevnění z hodnocených, jak pro buzení rázem tak elektrodynamickým budičem, vyhodnoceno upevnění Vossloh W 14. Při vyhodnocování tlumení pro buzení elektrodynamickým budičem nastaly potíže se stanovením hodnot tlumení, tyto hodnoty by bylo dobré pro další práci na tématu této bakalářské práce doplnit.

Při srovnání upevnění Vossloh W14 se starými a novými komponenty vyšlo jako více tlumící to se starými komponenty. Upevnění s novými komponenty lépe tlumilo pouze nízké frekvence v prvním vyhodnocovaném pásmu. Musím ovšem zmínit, že na upevnění Vossloh W14 s novými součástmi nedocházelo z hlediska frekvenční analýzy k rozvoji vibrací, tedy ač bylo vyhodnoceno jako méně tlumící, redukovalo lépe rozvoj vibrací jako takový.

Ze srovnání tlumení v laboratoři a v terénu jsem pozoroval, že změna tlumení je na porovnávaných významných frekvencích velice malá. Usuzuji tedy na velmi podobné chování konstrukce v terénu a v laboratoři. Považuji tedy vytvořený model za uspokojivý. I přesto doporučuji provést další řadu měření na větším vzorku upevnění v terénu, pro zpřesnění a potvrzení tohoto odhadu.

Doporučuji tedy pro zdokonalení uvedených metod provést rozsáhlejší měření v terénu, z kterých by se dalo usuzovat na globální chování kolejového roštu v terénu ve vztahu k měření v laboratoři. Metody buzení a následného získávání přenosových funkcí zatím nemohu prohlásit za srovnatelné, z důvodu rozdílných významných frekvencí. Při srovnání měření v laboratoři a v terénu jsem zjistil, že zvolená metodika měření v laboratoři byla dostatečná pro poměrně věrohodnou simulaci podmínek měření na reálné konstrukci.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] PLÁŠEK, Otto, Pavel ZVĚŘINA, Richard SVOBODA a Milan MOCKOVČIAK. *Železniční stavby: Železniční spodek a svršek*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004, 291 s. ISBN 80-214-2620-9.
- [2] Předpis SŽDC S3 Železniční svršek. 2008. Změna 01. 2011. TÚDC – Oddělení typové dokumentace. Olomouc
- [3] PUCHRÍK, Jaroslav. *Dopravní stavby*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004, 195 s. ISBN 80-214-2814-7.
- [4] SMUTNÝ, Jaroslav. *Železniční konstrukce II: Měřicí metody a signálová analýza* [online]. Brno, 2011 [cit. 2012-03-01].
- [5] MILÁČEK S.: Měření a vyhodnocování mechanických veličin. ČVUT Praha. 2001. ISBN 80-01-02417-2.
- [6] BREPTA R., PŮST L., TUREK F.: *Mechanické kmitání*. Praha: Nakladatelství Sobotáles, 1994. 592 s. ISBN 80-901684-8-5
- [7] BILOŠOVÁ, Alena. *Aplikovaný mechanik jako součást týmu konstruktérů a vývojářů: část Modální zkoušky* [online]. první. Ostrava, 2012 [cit. 2012-03-01]. Dostupné z: [http://www.337.vsb.cz/materialy/BilosovaAlena\\_EMAskripta.pdf](http://www.337.vsb.cz/materialy/BilosovaAlena_EMAskripta.pdf)
- [8] SMUTNÝ, Jaroslav, Vladimír TOMANDL a Luboš PAZDERA. Dynamické působení železniční dopravy na kolejový rošt s pružným upevněním kolejnic při průjezdu obloukem. *Silnice Železnice: Zajímavosti* [online]. 2010, s. 9 [cit. 2012-03-01]. Dostupné z: <http://www.silnice-zeleznice.cz/UserFiles/files/SZ/2010/priloha.pdf>
- [9] AUTORSKÝ KOLEKTIV BRÜEL & KJÆR: Měření chvění. Nové vydání, 1984. Dostupné na www: <http://www.spectris.cz/sv/literatura.html>
- [10] TOMANDL V.: Analýza dynamických parametrů kolejnicových upevnění. Diplomová práce. Brno. 2007. 145 s., 204 s. příl. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav železničních konstrukcí a staveb. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jaroslav Smutný, Ph.D.
- [11] Česká technická norma ČSN EN 13146-9. Železniční aplikace - Kolej - Metody zkoušení systémů upevnění - Část 9: Stanovení tuhosti. Účinná od 1.7.2010.
- [12] KOTEK J.: Měření a analýza dynamicko – akustických parametrů kolejnicových upevnění. Diplomová práce. VUT v Brně. 2003.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ:

$A_{\max}/A_{\text{ef}}$	činitel amplitudy [-]
$a$	zrychlení mechanického kmitání (vibrací) [ $\text{m/s}^2$ ]
$A_b$	snímač na budiči
$A_k$	snímač na patě kolejnice
$A_p$	snímač na hlavě pražce
$A_s$	měřicí kámen na ložné ploše pražce
ČD	České dráhy a.s.
$D$	útlum chvění [dB]
$D_p$	přenosový útlum chvění [dB]
$E$	energie signálu [ $\text{m/s}^2$ ]
$f$	frekvence (kmitočet) [Hz]
$F$	svíslá síla [N]
FFT	rychlá Fourierova transformace
FRF	přenosová funkce systému (frekvenční přenosová funkce)
FRA	analyzátor přenosových funkcí
$F\{\}$	Fourierova transformace
$F^{-1}\{\}$	inverzní funkce Fourierovy transformace
$h(t)$	přenosová funkce
$H(f)$	amplitudové spektrum
$H(\omega)$	průběh amplitudy
$H_{\text{res}}$	špičková hodnota amplitudy [dB]
$H_{\text{halfpower}}$	poloviční hodnota amplitudy [dB]
$P_1, P_2$	body poloviční hodnoty amplitudy na jejím grafu
$k$	náhradní pérová konstanta; přirozené číslo; konstanta úměrnosti; obecná konstanta; frekvenční složka
SŽDC	Správa železniční dopravní cesty s.o.
$t$	čas [s]
$T$	perioda; doba trvání realizace [s]
ÚPKO	Ústav pozemních komunikací
ÚŽKS	Ústav železničních konstrukcí a staveb
$v$	akustická rychlost; rychlost mechanického kmitání (vibrací); složka vektoru posuvu [ $\text{m/s}$ ]

VUT.....	Vysoké učení technické
$x$ .....	osa pravoúhlého souřadnicového systému
$X$ .....	frekvenční složka signálu
$X(f), Y(f)$ .....	Fourierův obraz signálu ve frekvenční oblasti
$x(t)$ .....	náhodný proces; realizace signálu v časové oblasti; vstupní signál (buzení)
$y$ .....	výchylka mechanického kmitání (vibrací); osa pravoúhlého souřadnicového systému [m]
$y(t)$ .....	vstupní signál; náhodná složka signálu; výstupní signál (odezva)
$z$ .....	osa pravoúhlého souřadnicového systému
'*'.....	komplexní konjunkce
$\Delta\omega_{3dB}$ .....	3dB šířka pásma
$\Omega_0$ .....	vlastní kruhová frekvence netlumeného kmitání [ $s^{-1}$ ]
$\zeta$ .....	poměrný útlum [-]
$\omega_1, \omega_2$ .....	frekvence odpovídající bodům poloviční hodnoty amplitudy na jejím grafu

# PŘÍLOHY

## SEZNAM PŘÍLOH:

PŘÍLOHA A	Fotodokumentace .....	2
PŘÍLOHA B	Srovnání způsobů buzení.....	10
PŘÍLOHA C	Srovnání typů upevnění.....	17
PŘÍLOHA D	Srovnání upevnění Vossloh W14 nové a staré.....	21
PŘÍLOHA E	Srovnání měření v laboratoři a v terénu.....	23
PŘÍLOHA F	Vliv stavu dotažení.....	25
PŘÍLOHA G	Tlumení.....	36
PŘÍLOHA H	Vyhodnocení v časové oblasti.....	42

# PŘÍLOHA A

Fotodokumentace



*Obr A.1 Kolejové lože pro zkoušky v laboratoři*



*Obr A.2 Kontrola výšky kolejového lože pod ložnou plochou pražce*





*Obr A.3 Přemísťování vzorků na kolejové lože pomocí jeřábu*



*Obr A.4 Snímač v měřicím kameni*





*Obr A.5 Umístění snímačů na upevnění Pandrol FC I*



*Obr A.6 Umístění snímačů na upevnění Vossloh W14*





*Obr A.7 Buzení kladivem*

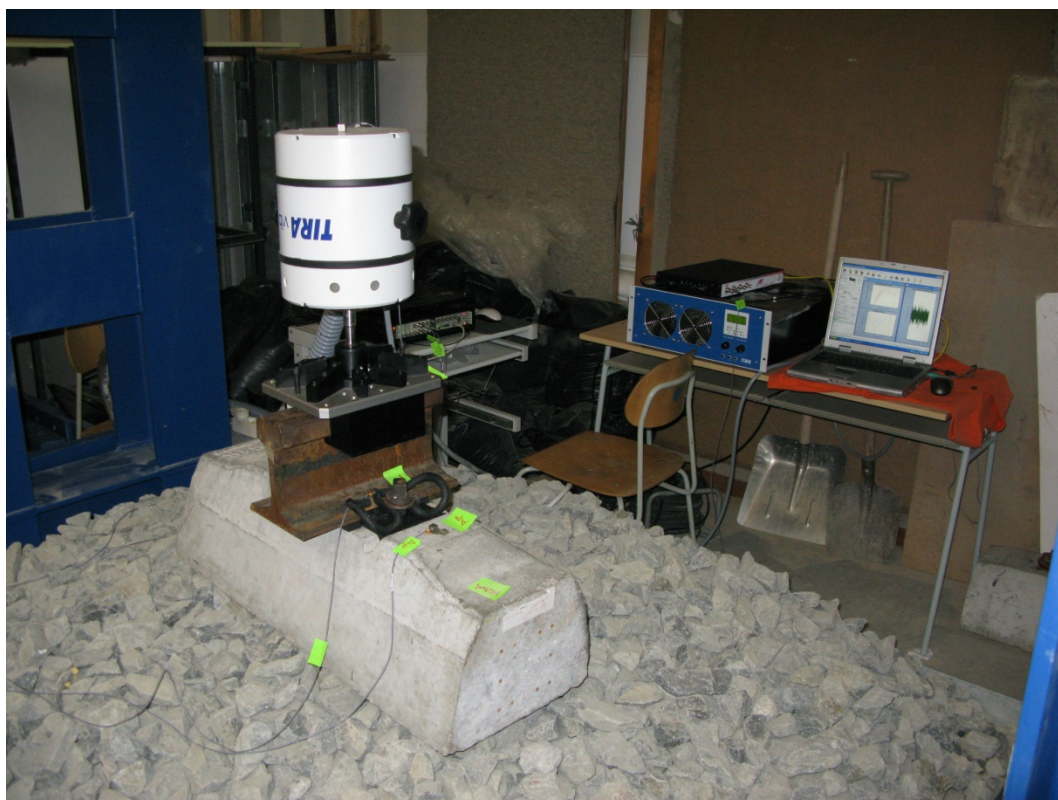


*Obr A.8 Zapojení snímačů do analyzátoru*





*Obr A.9 Elektrodynamický budič připevněný na vzorek*



*Obr A.10 Celé měřicí stanoviště*





*Obr A.11 Umístění snímačů při měření v terénu; Pandrol FC I*



*Obr A.12 Umístění snímačů při měření v terénu; Vossloh W14*





*Obr A.13 Buzení kladivem při měření v terénu*

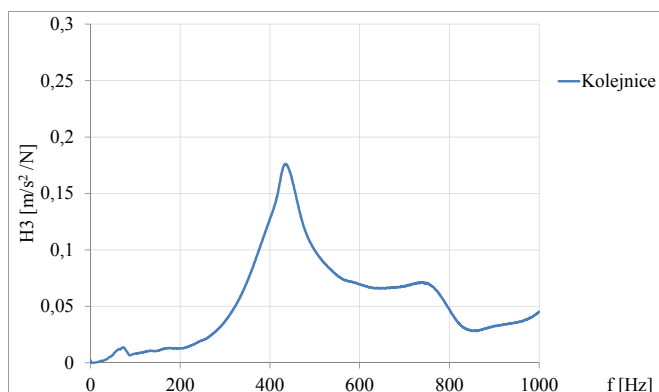


*Obr A.14 Celkové uspořádání zkoušky v terénu*

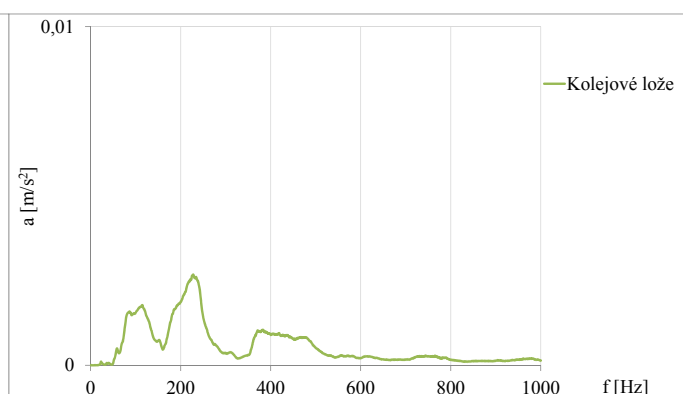
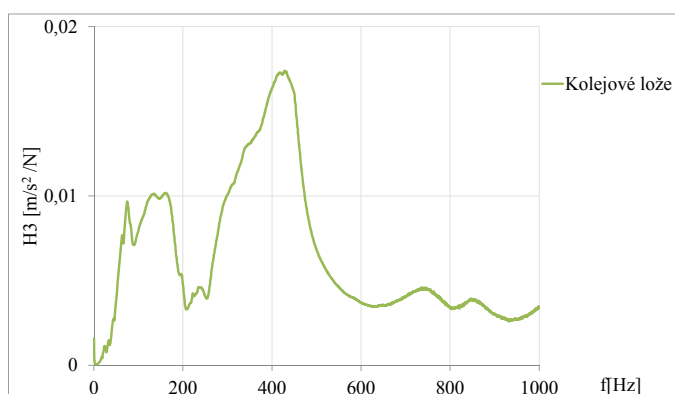
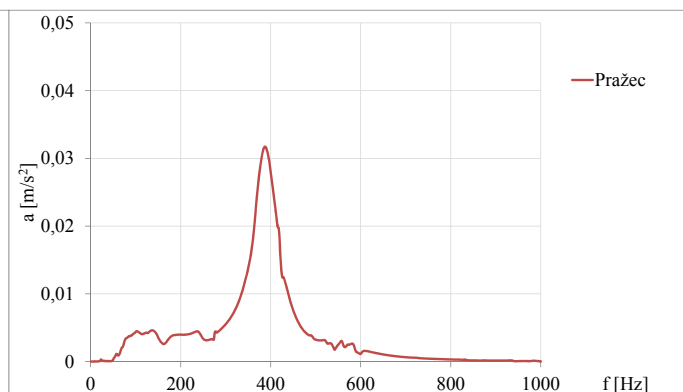
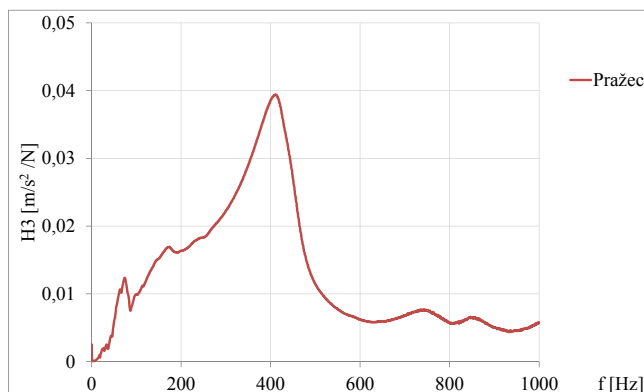
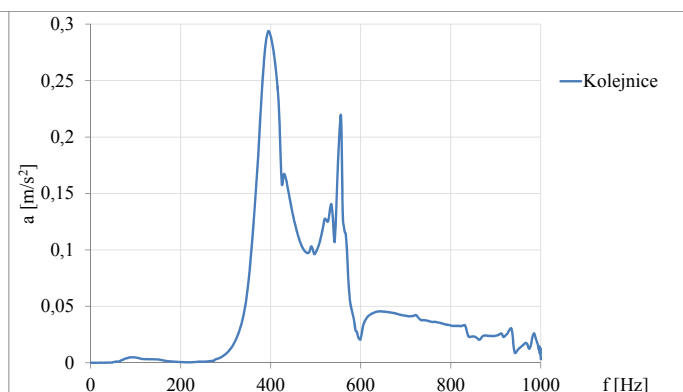
# **PŘÍLOHA B**

Srovnání způsobů buzení

Buzení rázem



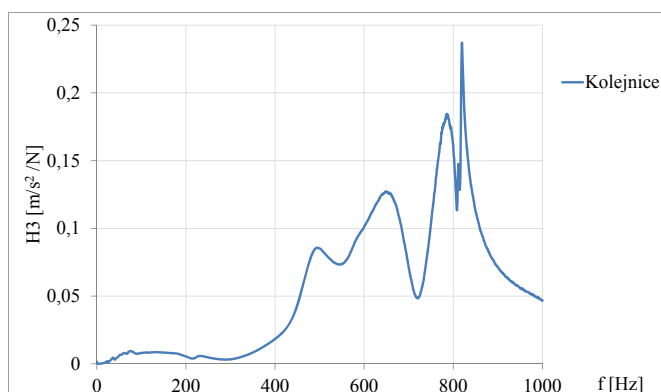
Buzení elektrodynamickým budičem



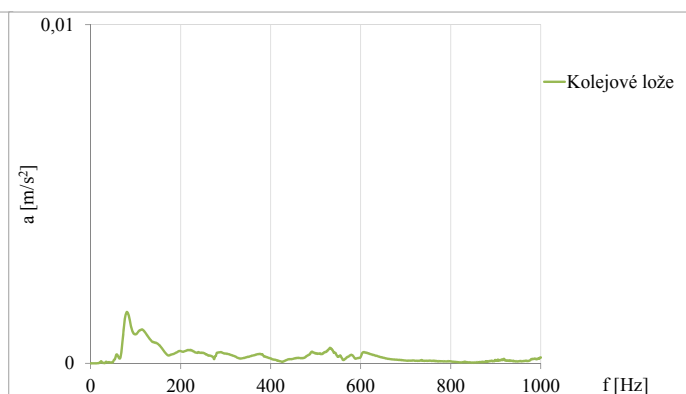
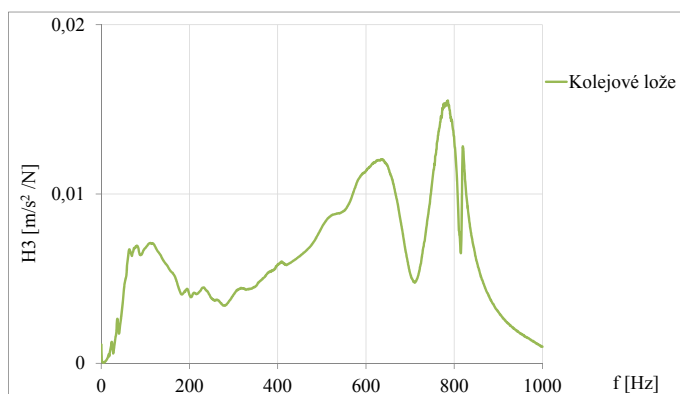
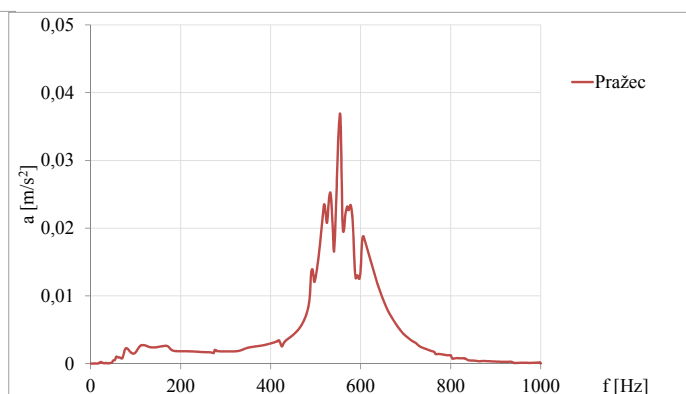
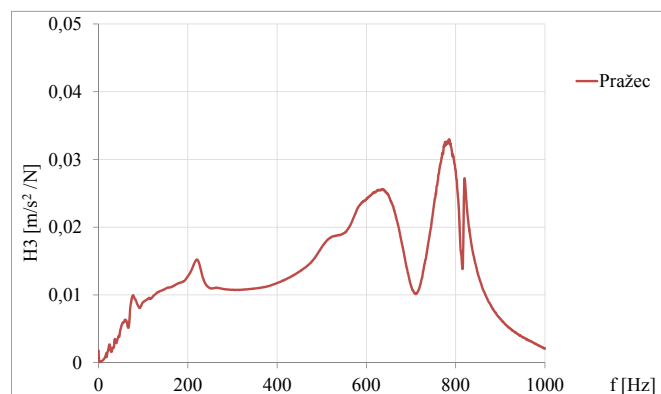
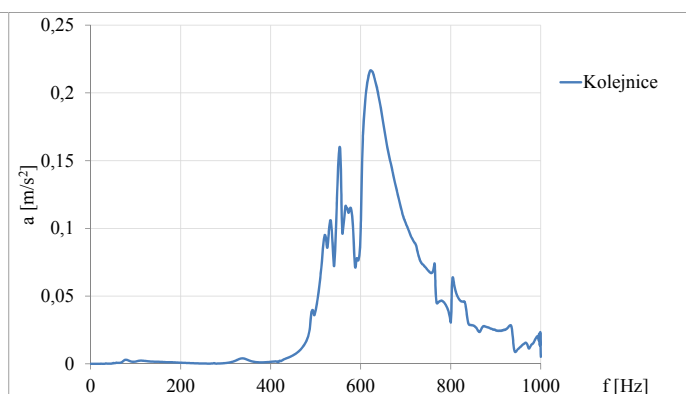
Graf B.1 Sestava průběhu  $H_3$  s amplitudových spekter pro upevnění Pandrol FC I; buzení rázem a elektrodynamickým budičem



Buzení rázem

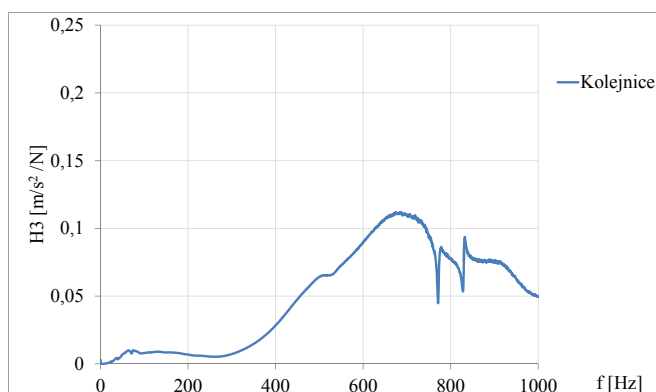


Buzení elektrodynamickým budičem

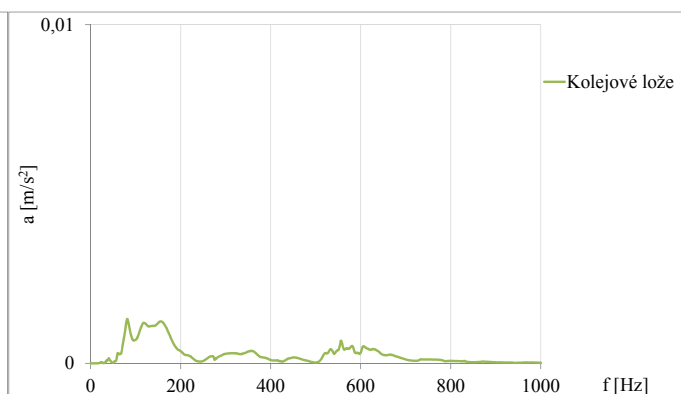
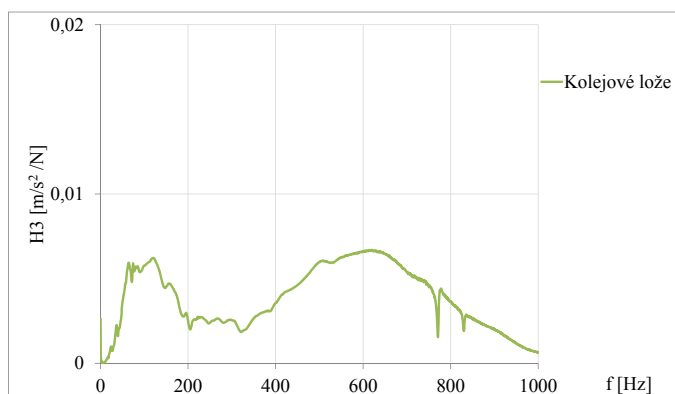
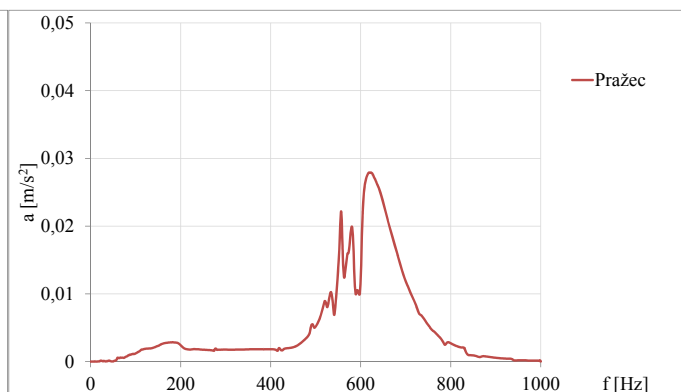
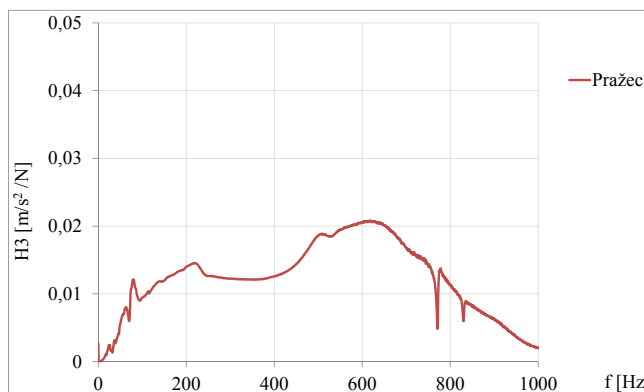
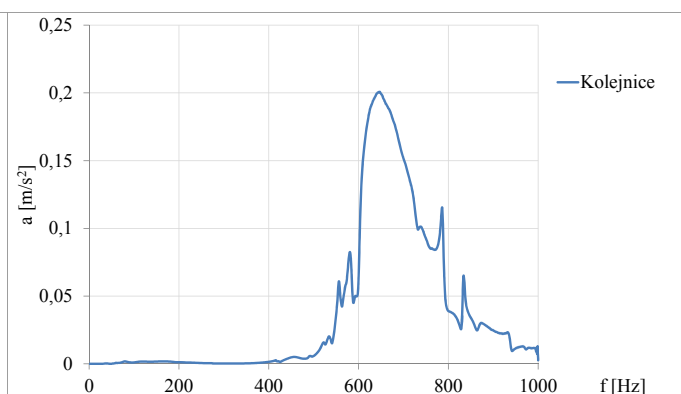


Graf B.2 Sestava průběhu  $H_3$  s amplitudových spekter pro upevnění Vossloh W14; buzení rázem a elektrodynamickým budičem

Buzení rázem

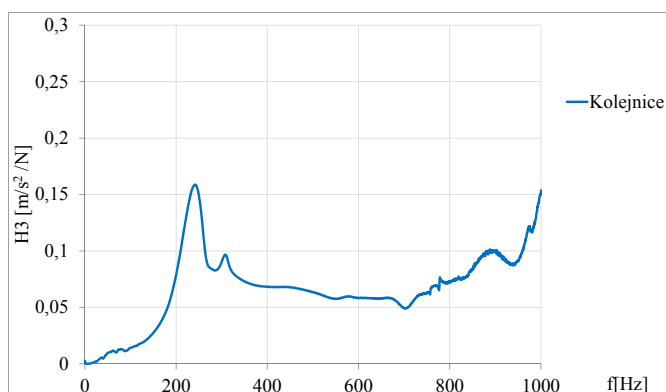


Buzení elektrodynamickým budičem

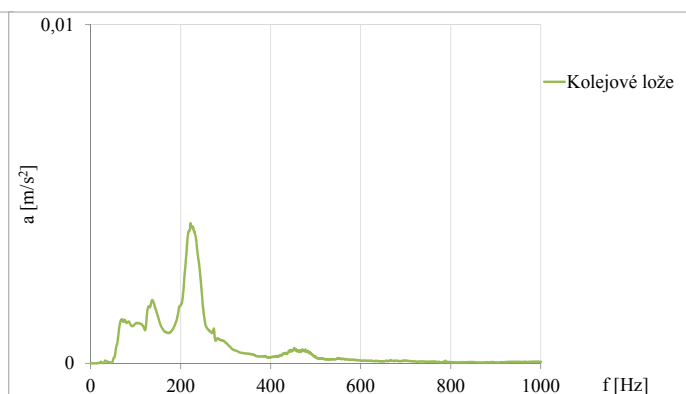
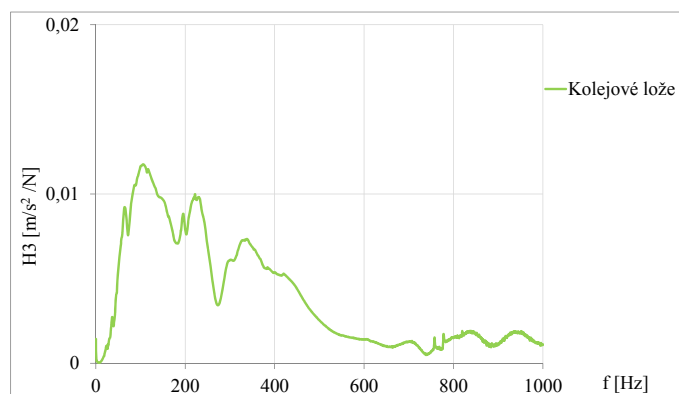
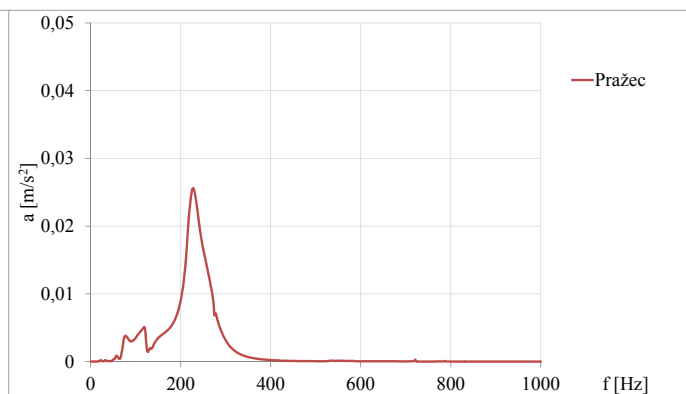
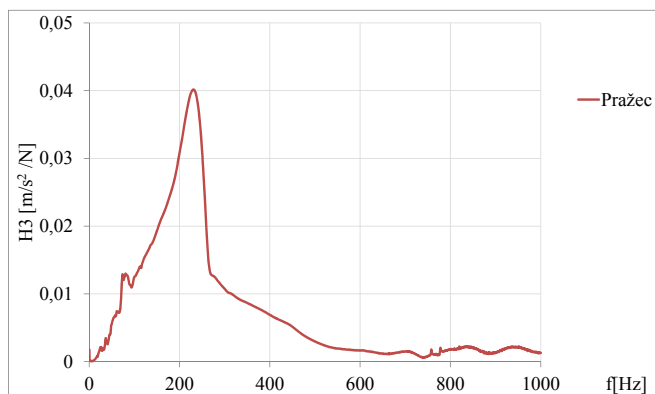
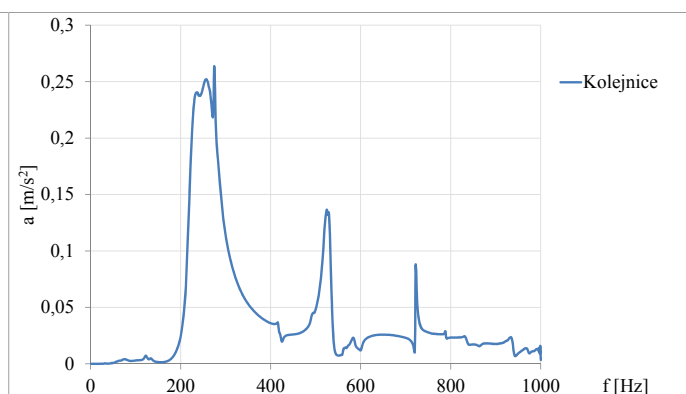


Graf B.3 Sestava průběhu  $H3$  s amplitudových spekter pro upevnění Vossloh W14 nové; buzení rázem a elektrodynamickým budičem

Buzení rázem

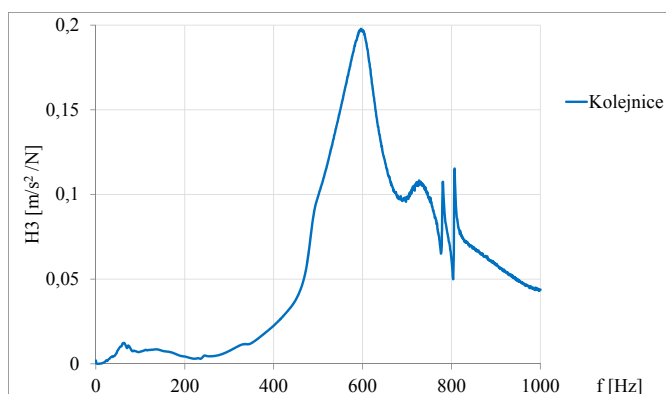


Buzení elektrodynamickým budičem

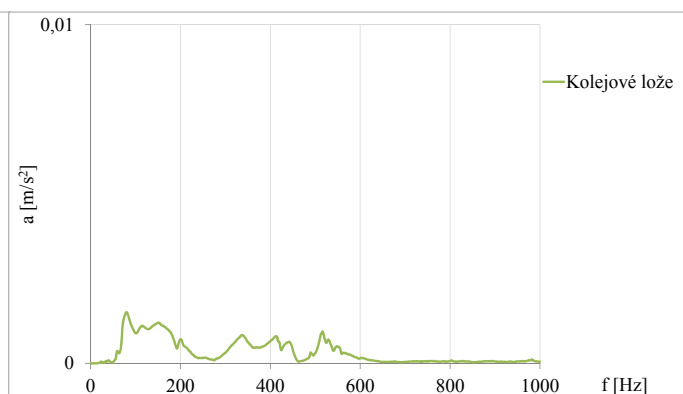
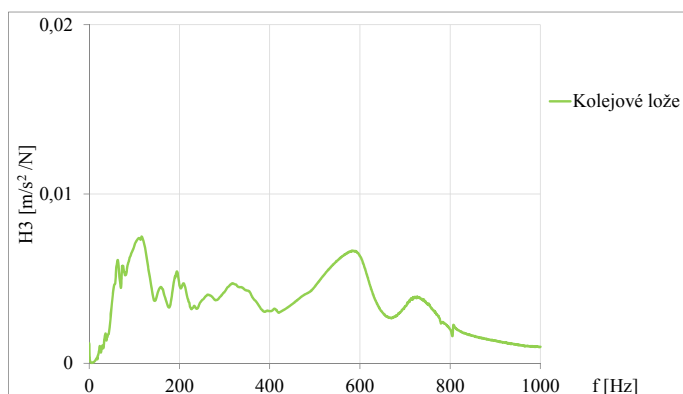
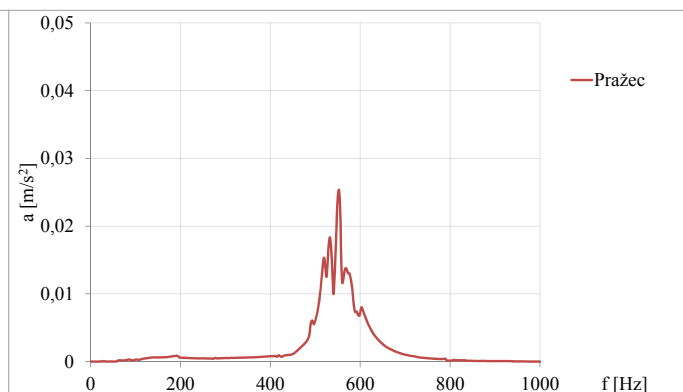
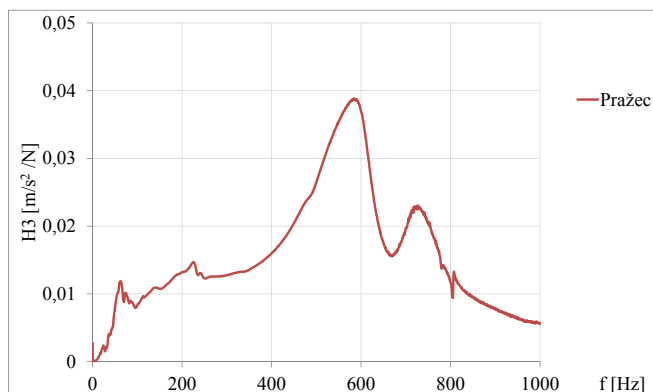
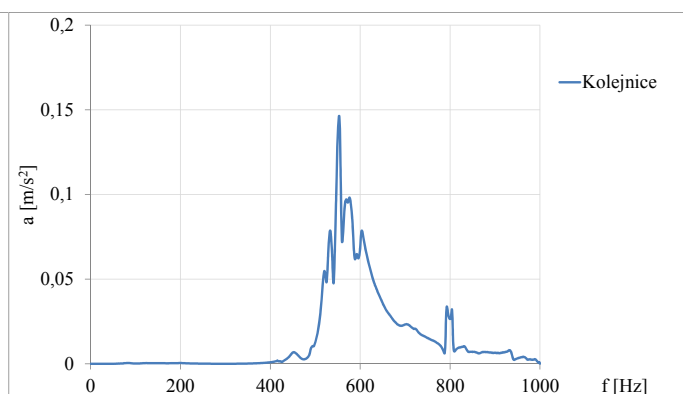


Graf B.4 Sestava průběhu  $H3$  s amplitudových spekter pro upevnění Vossloh E14; buzení rázem a elektrodynamickým budičem

Buzení rázem

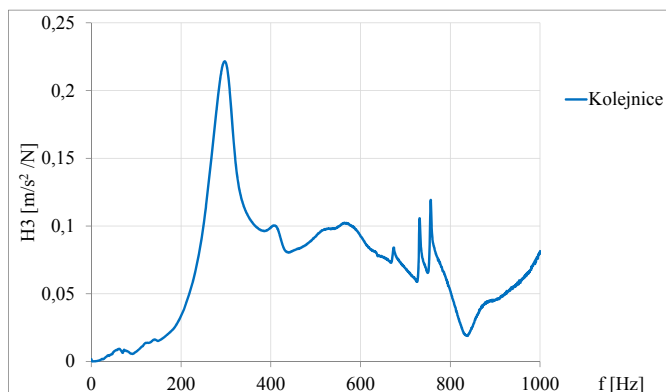


Buzení elektrodynamickým budičem

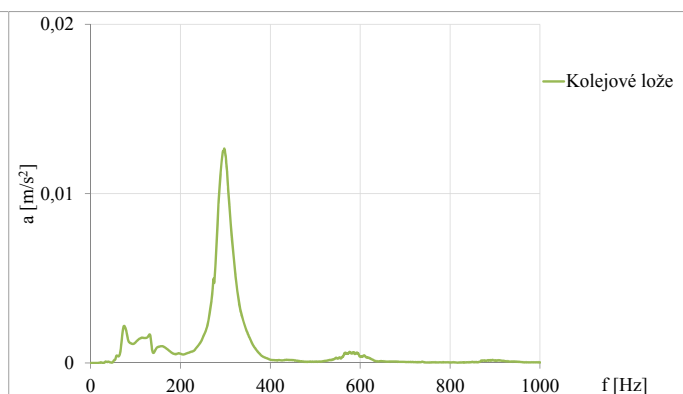
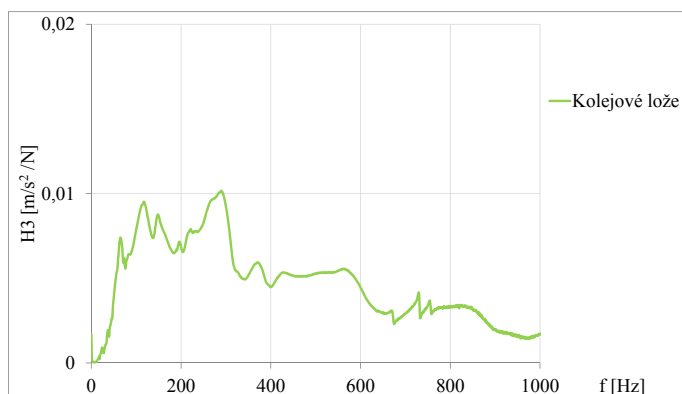
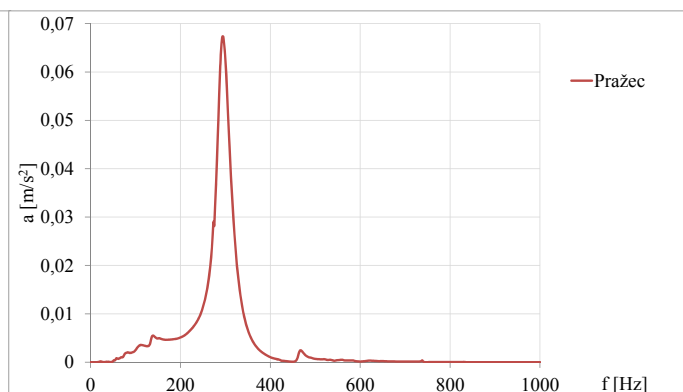
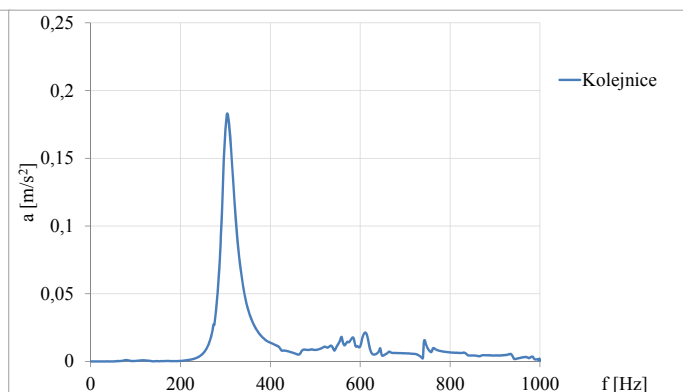


Graf B.5 Sestava průběhu  $H3$  s amplitudových spekter pro upevnění Vossloh W14NT; buzení rázem a elektrodynamickým budičem

Buzení rázem



Buzení elektrodynamickým budičem

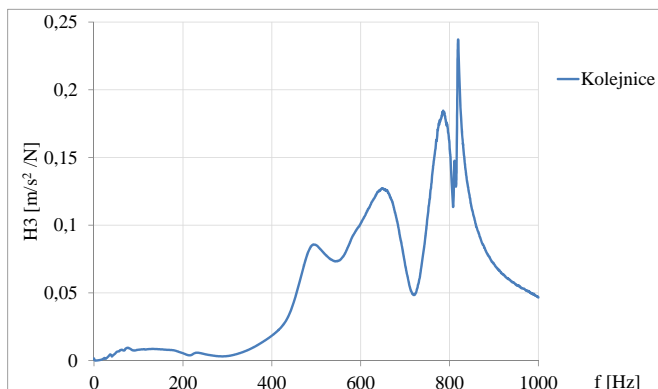


Graf B.6 Sestava průběhu  $H_3$  s amplitudových spekter pro upevnění Vossloh W21; buzení rázem a elektrodynamickým budičem

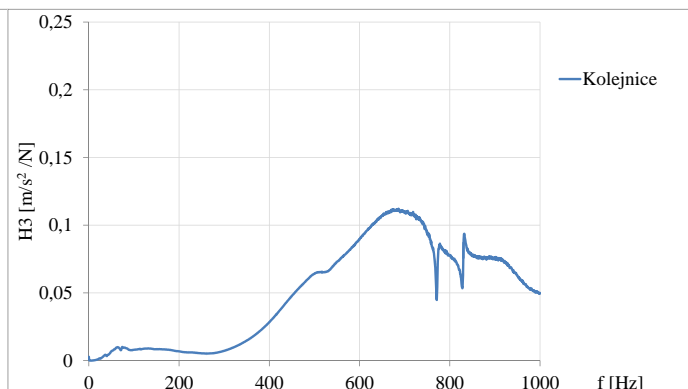
# **PŘÍLOHA C**

Srovnání typů upevnění

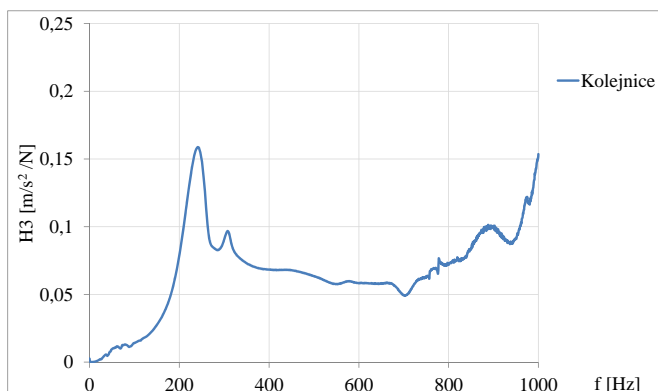
Vossloh W14



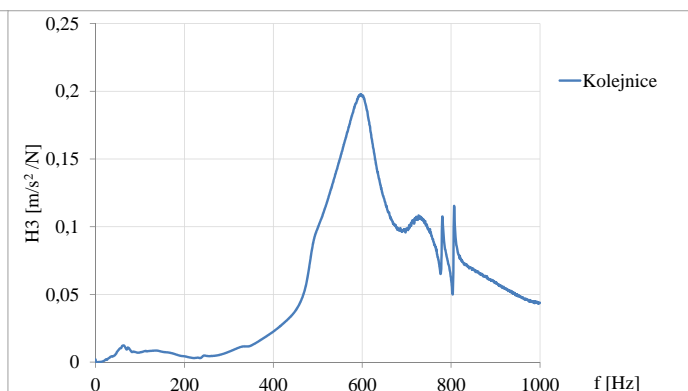
Vossloh W14 nové



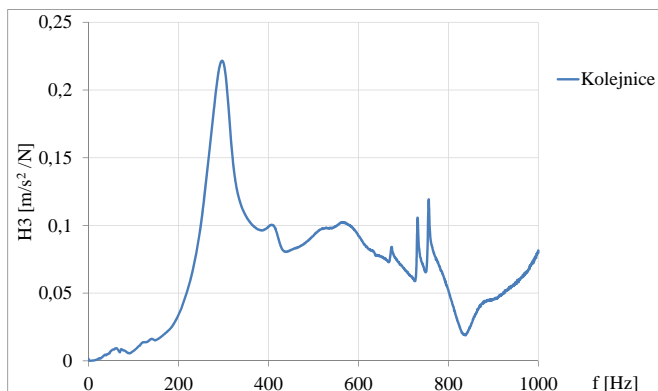
Vossloh E14



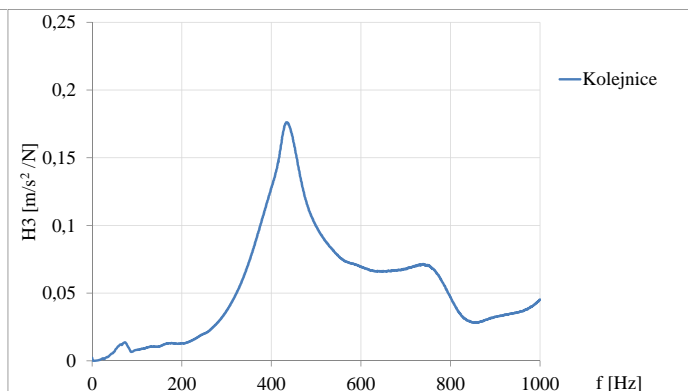
Vossloh W14NT



Vossloh W21

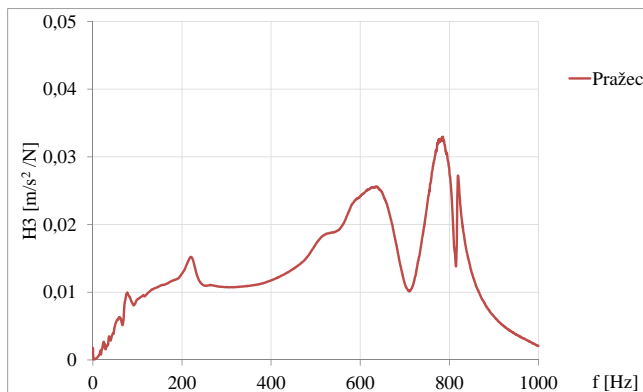


Pandrol FC I

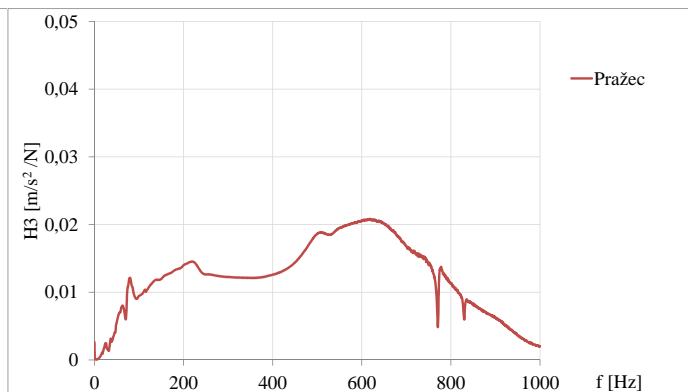


Graf C.1 Sestava průběhu  $H_3$  pro srovnání upevnění typu Vossloh a Pandrol FC I; signál z kolejnice

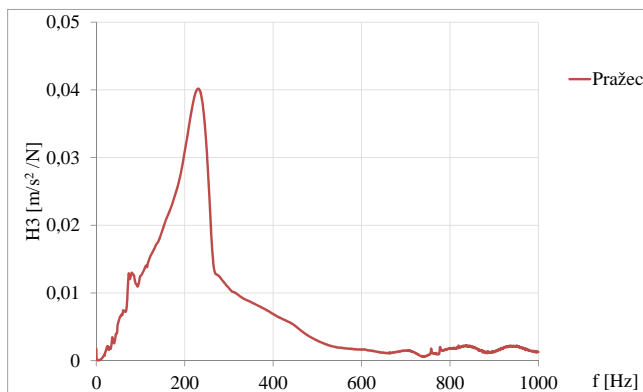
Vossloh W14



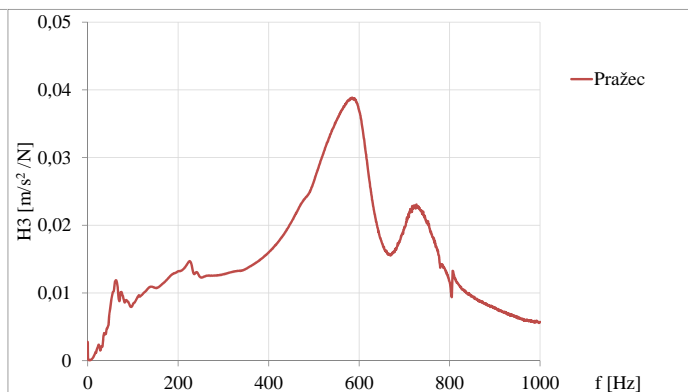
Vossloh W14 nové



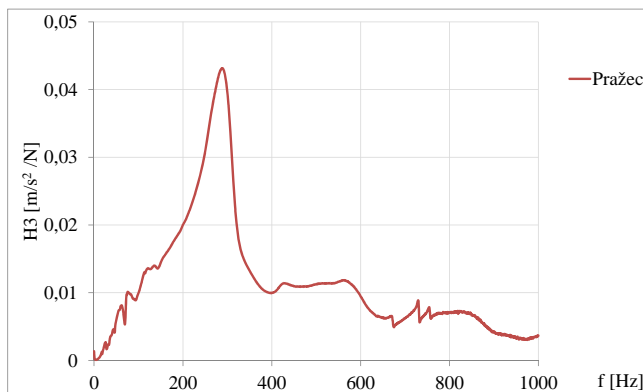
Vossloh E14



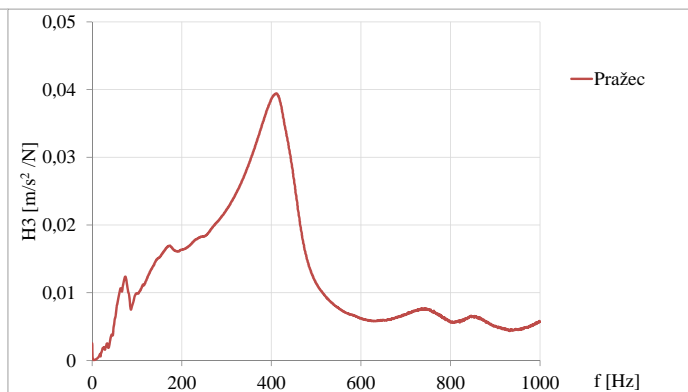
Vossloh W14NT



Vossloh W21



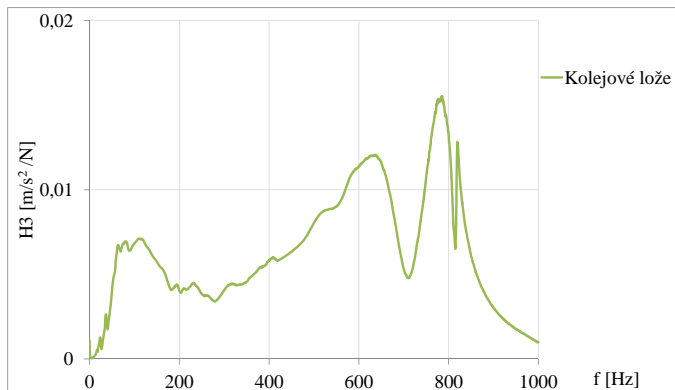
Pandrol FC I



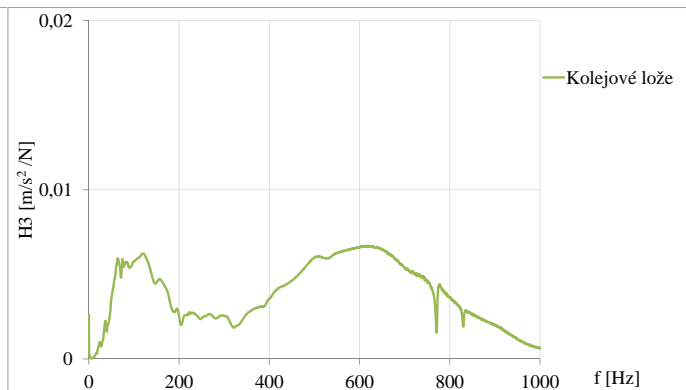
Graf C.2 Sestava průběhu H3 pro srovnání upevnění typu Vossloh a Pandrol FC I; signál z pražce



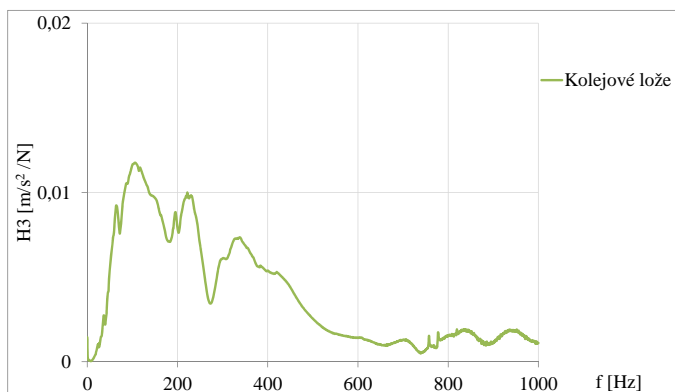
Vossloh W14



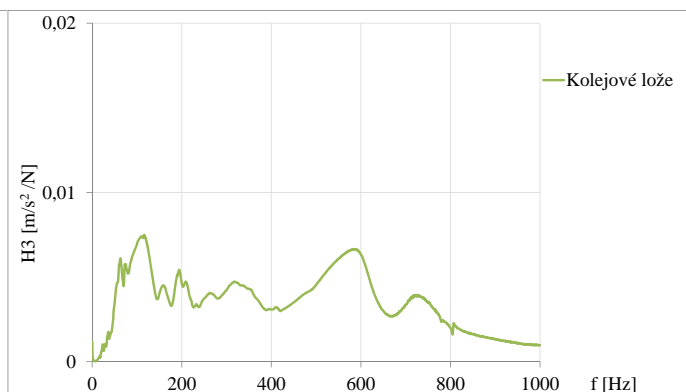
Vossloh W14 nové



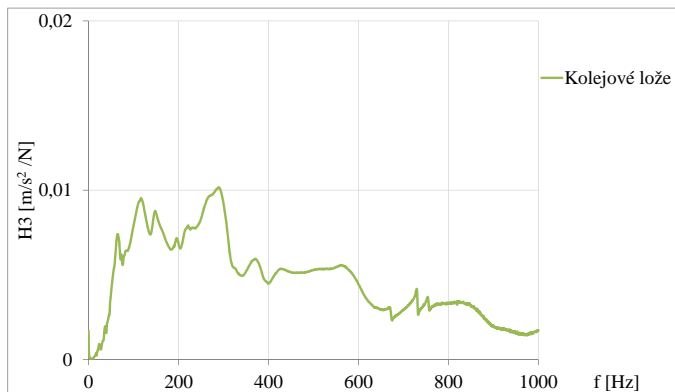
Vossloh E14



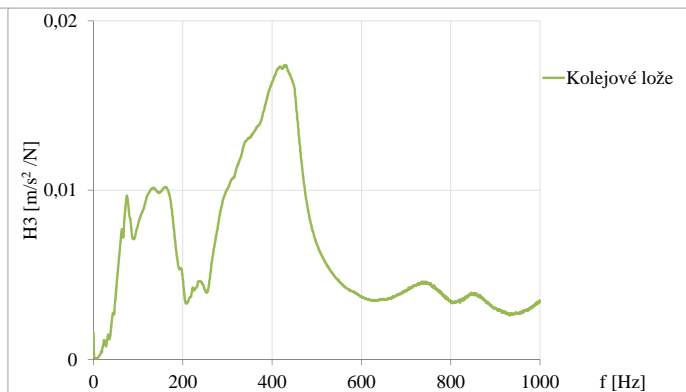
Vossloh W14NT



Vossloh W21



Pandrol FC I

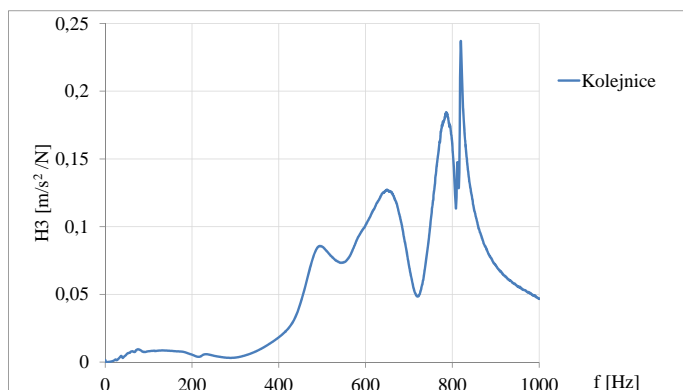


Graf C.3 Sestava průběhu H3 pro srovnání upevnění typu Vossloh a Pandrol FC I; signál z kolejového lože

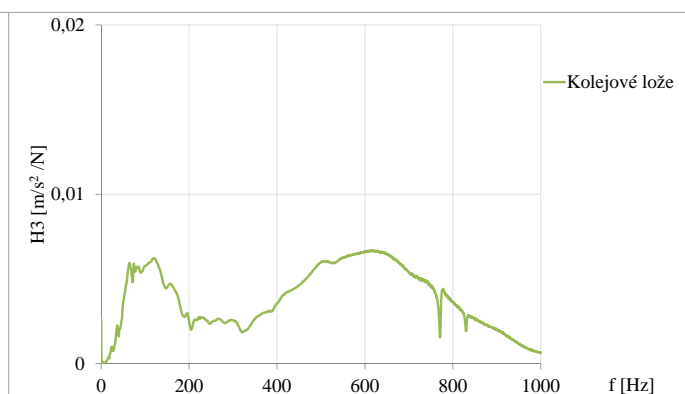
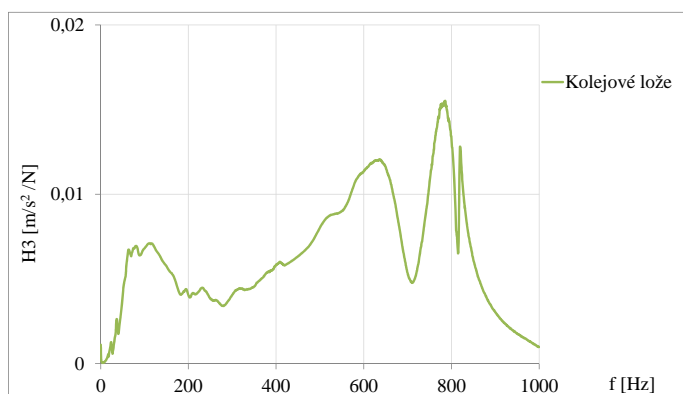
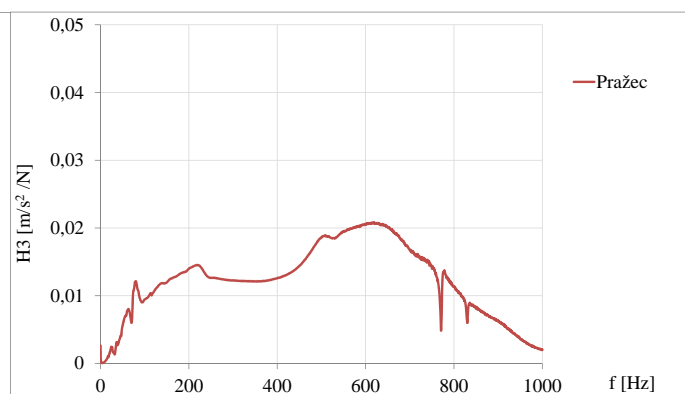
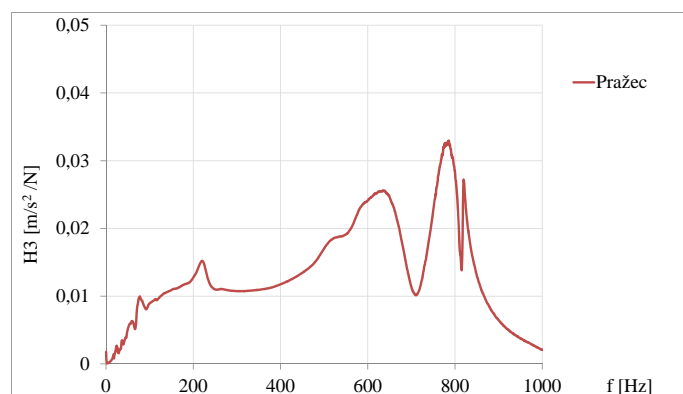
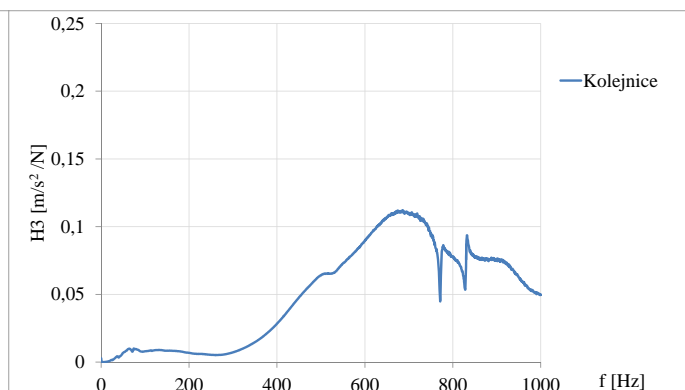
# **PŘÍLOHA D**

Srovnání upevnění Vossloh W14 nové a staré

Vossloh W14



Vossloh W14 nové



Graf D.1 Sestava průběhu H3 pro srovnání upevnění typu Vossloh W14 a Vossloh W14 nové

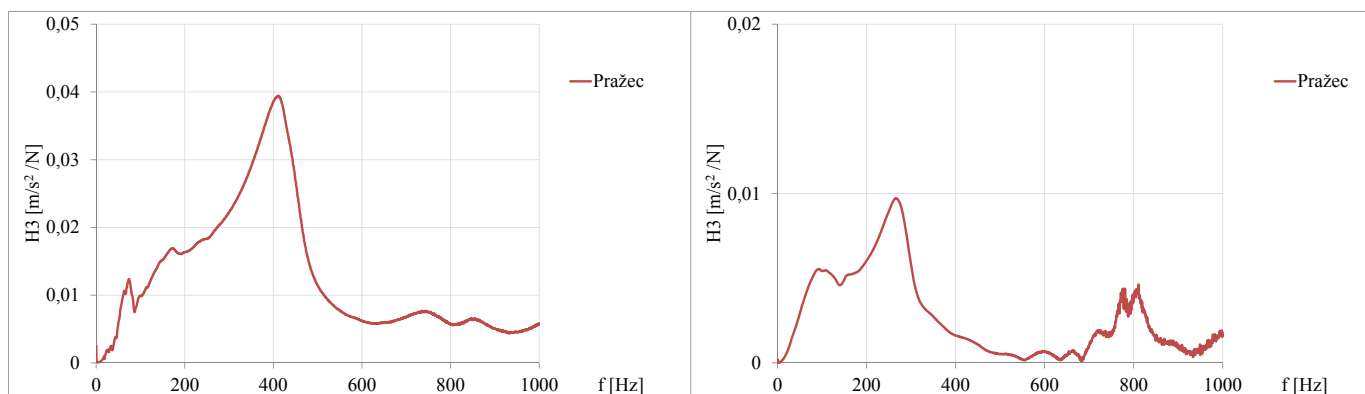
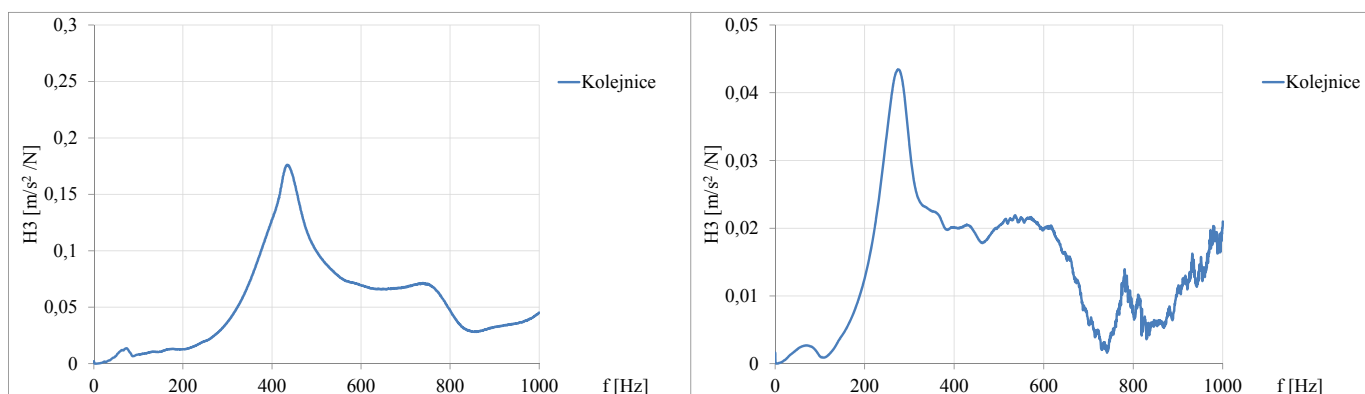
# **PŘÍLOHA E**

Srovnání měření v laboratoři a v terénu

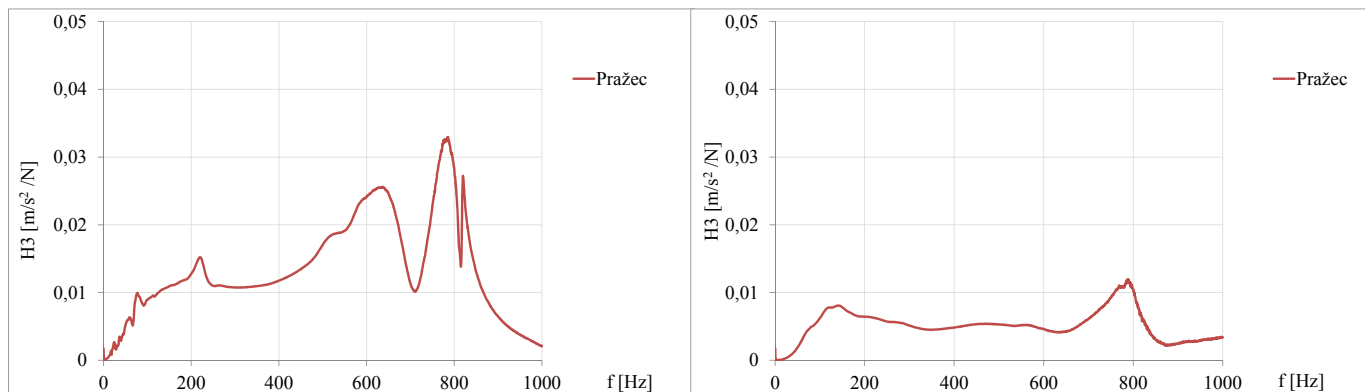
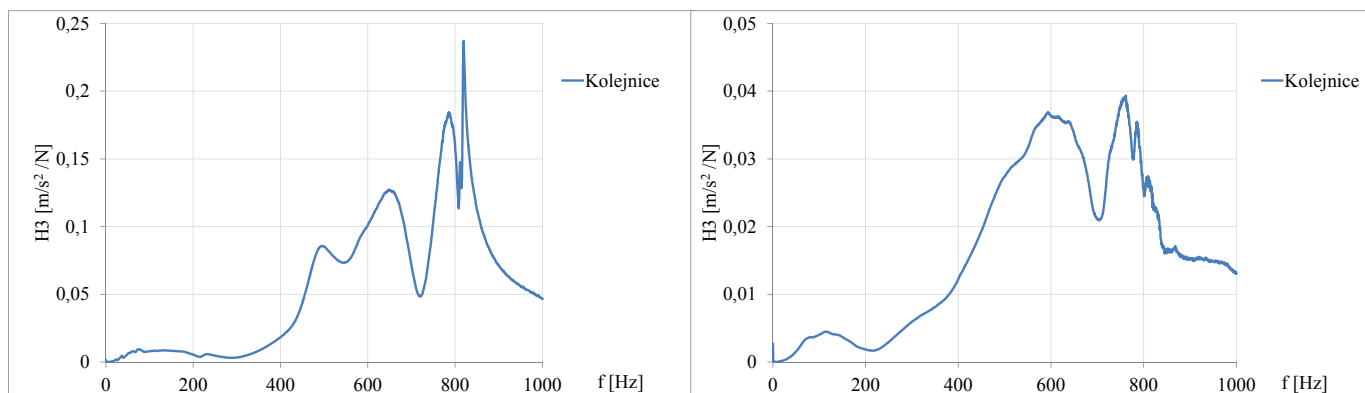
Měření v laboratoři

Měření v terénu

Pandrol FC I



Vossloh W14

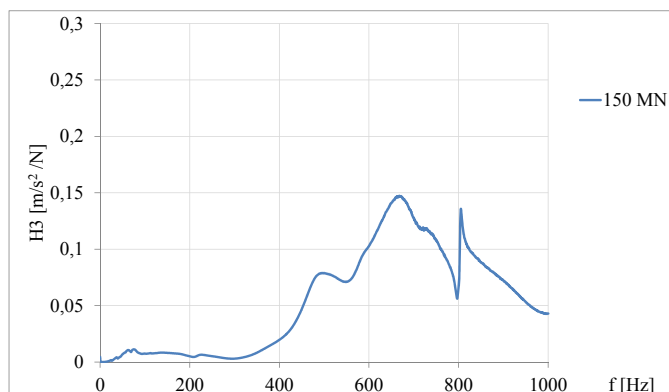


Graf E.1 Sestava průběhu  $H_3$  pro srovnání měření v laboratoři a v terénu upevnění Pandrol FC I a Vossloh W14

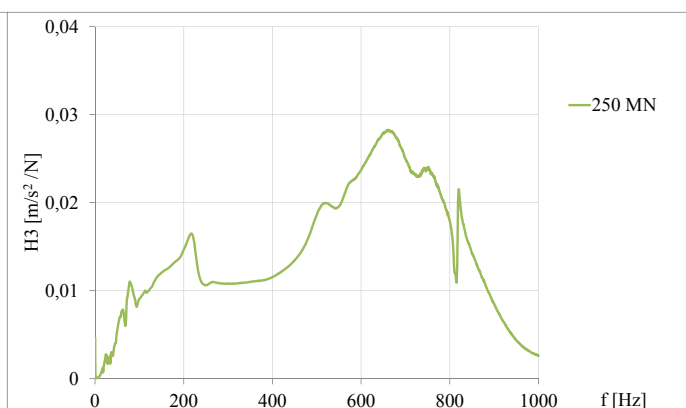
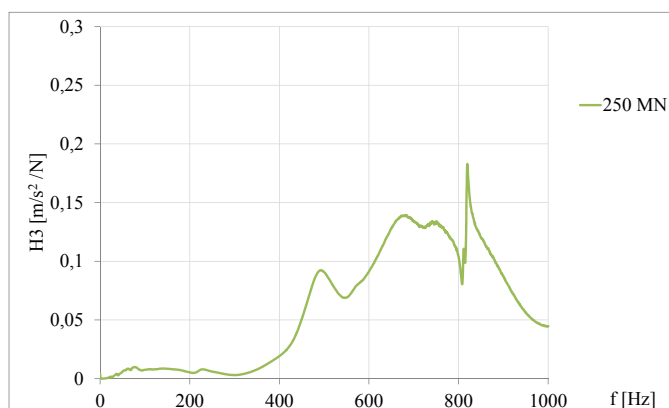
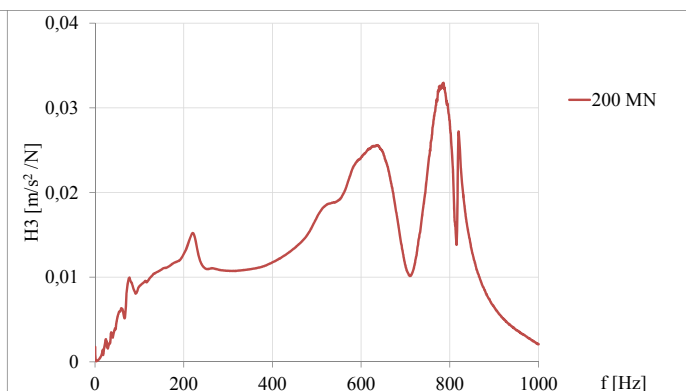
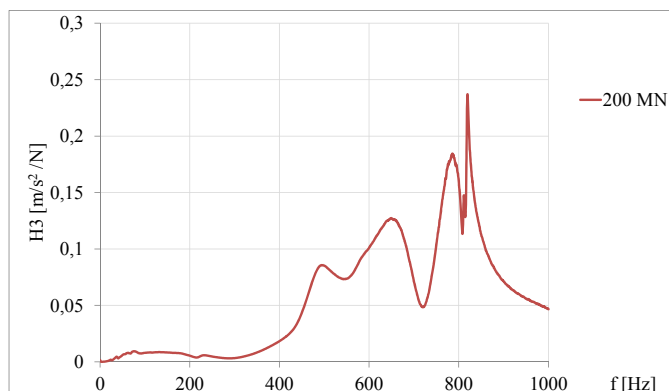
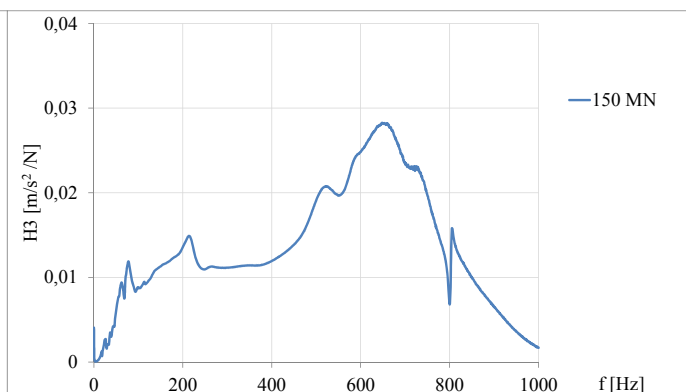
# PŘÍLOHA F

Vliv stavu dotažení

Signál na kolejnici

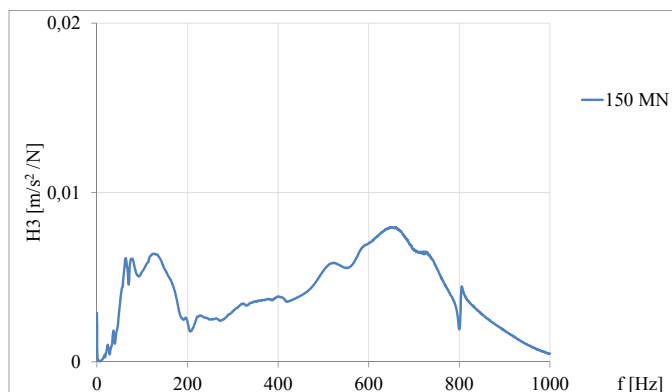


Signál na pražci



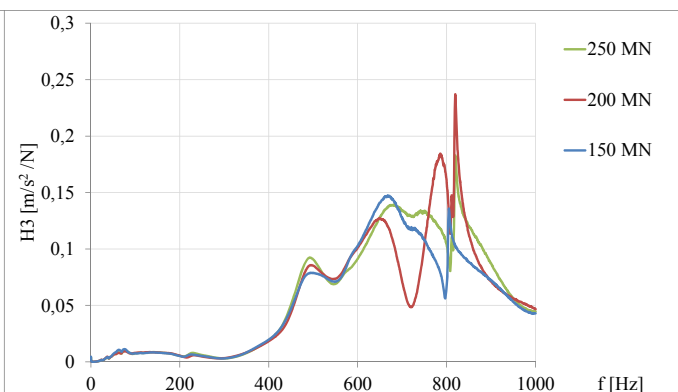
Graf F.1 Sestava průběhu H3 pro srovnání míry dotažení upevnění Vossloh W14; kolejnice, pražec

Signál v kolejovém loži

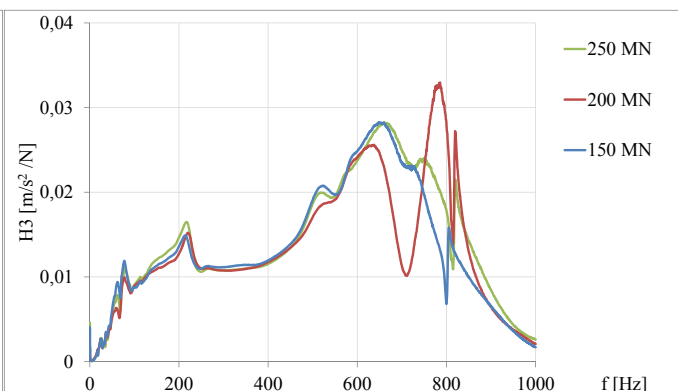
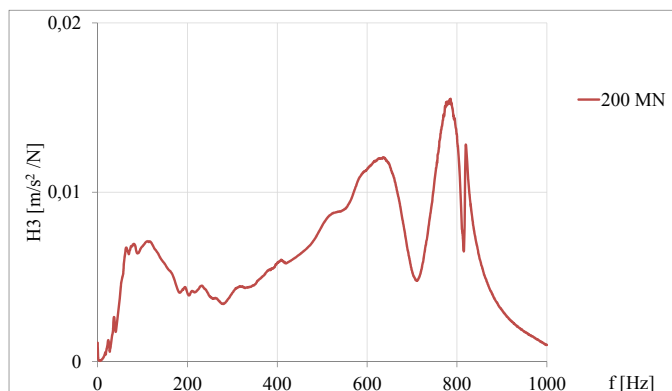


Prolnutí signálů

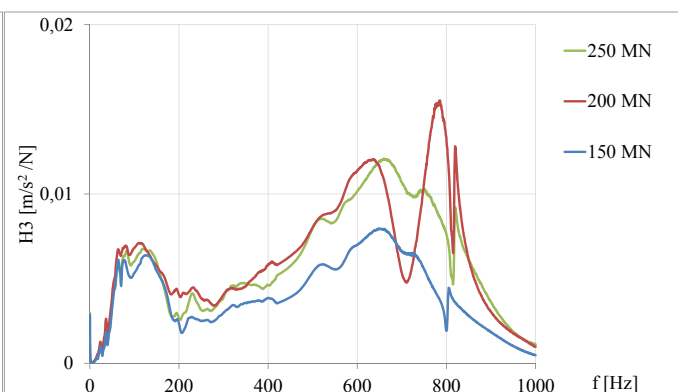
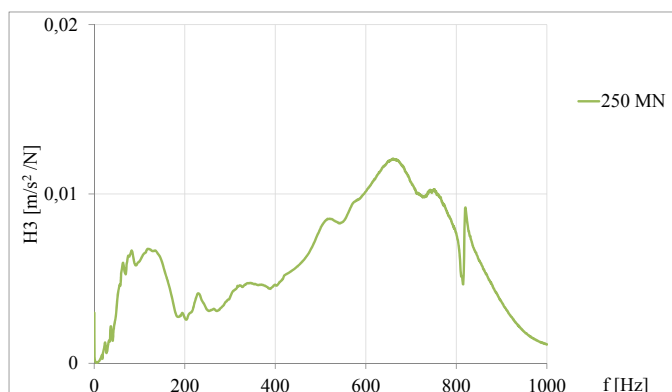
Kolejnice



Pražec



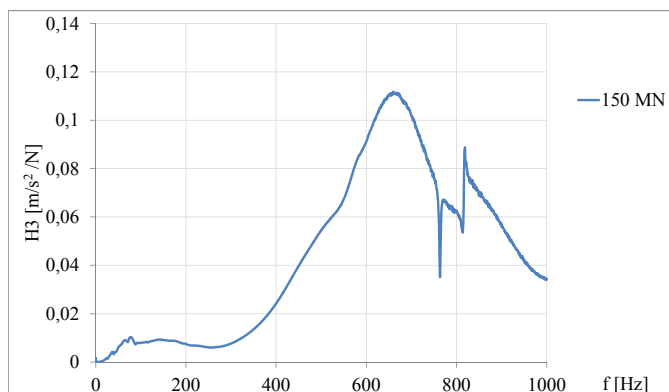
Kolejové lože



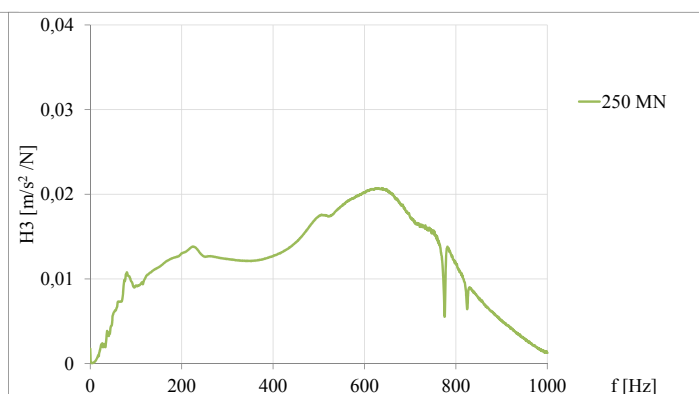
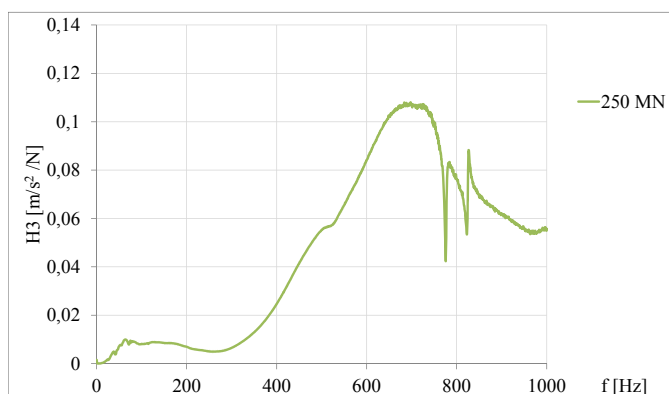
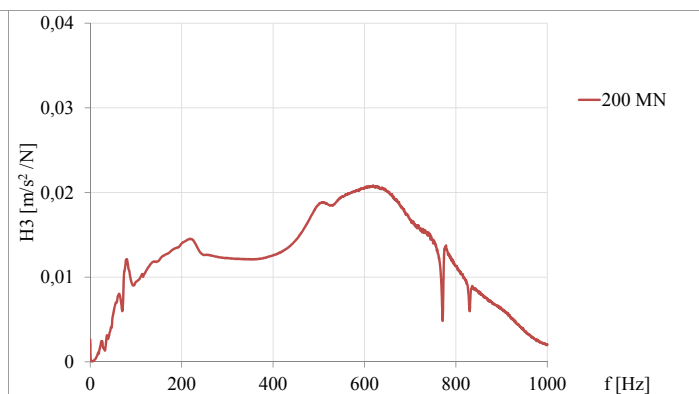
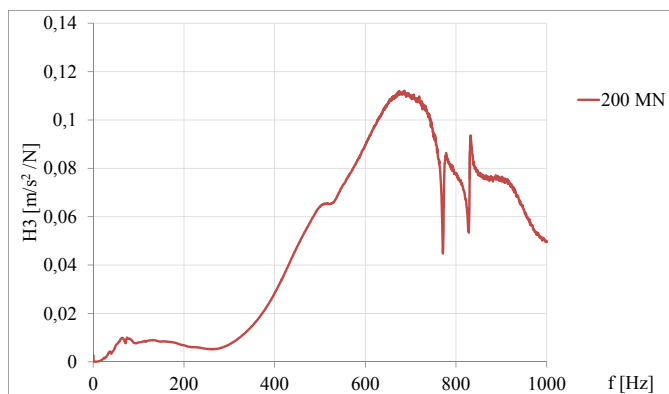
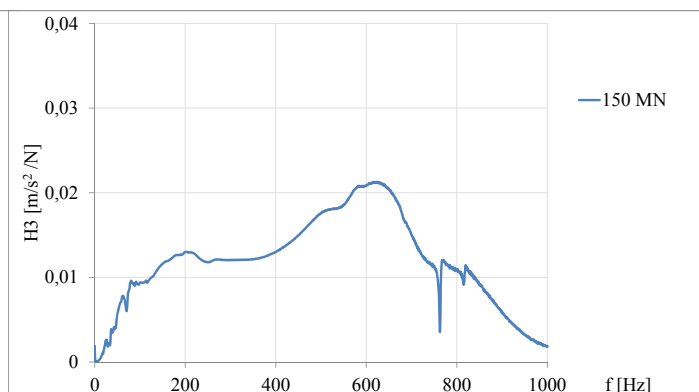
Graf F.2 Sestava průběhu  $H3$  pro srovnání míry dotažení upevnění Vossloh W14; kolejové lože, prolnutí



Signál na kolejnici

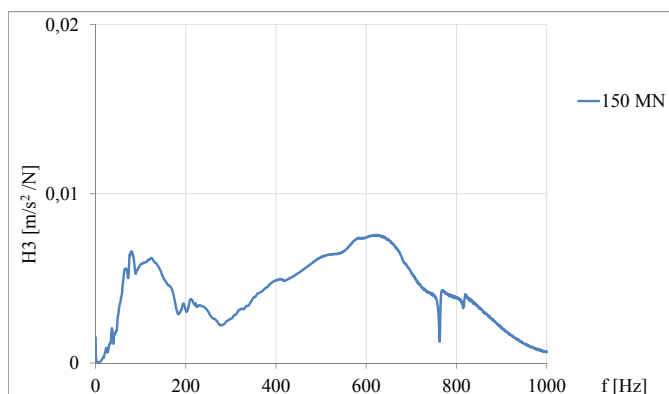


Signál na pražci



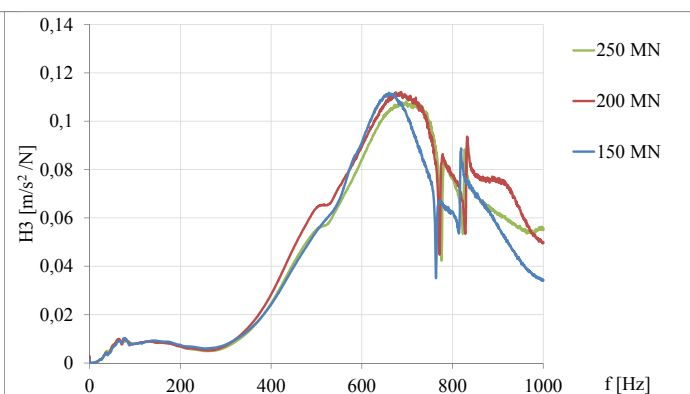
Graf F.3 Sestava průběhu H3 pro srovnání míry dotažení upevnění Vossloh W14 nové; kolejnice, pražec

Signál v kolejovém loži

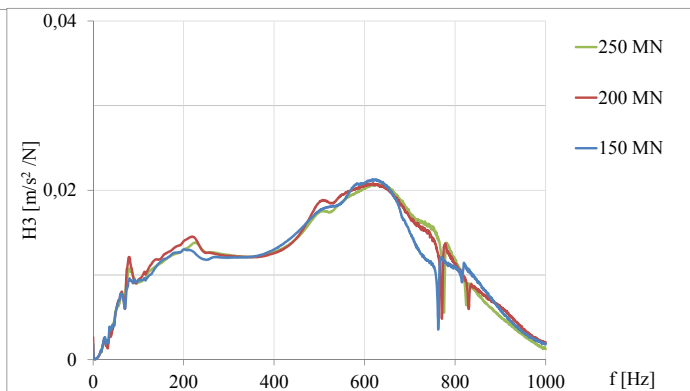
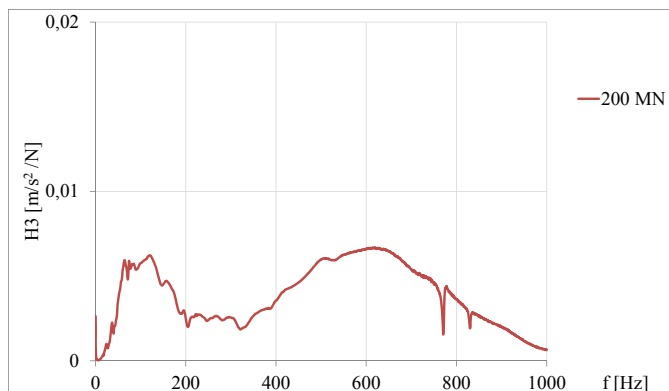


Prolnutí signálů

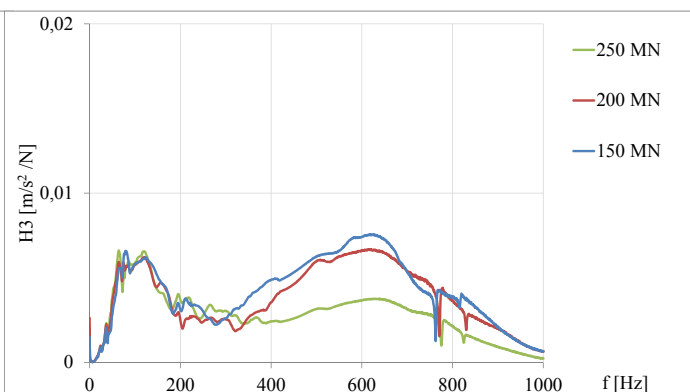
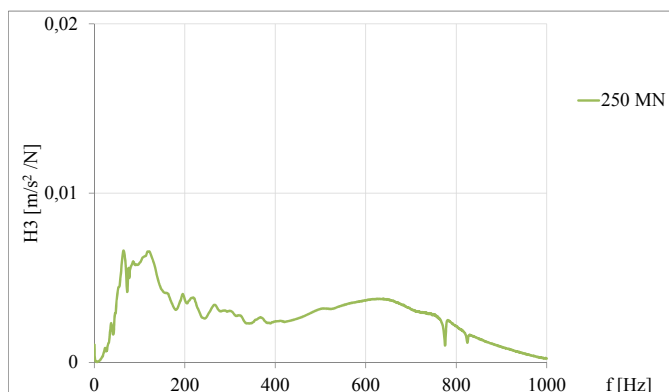
Kolejnice



Pražec

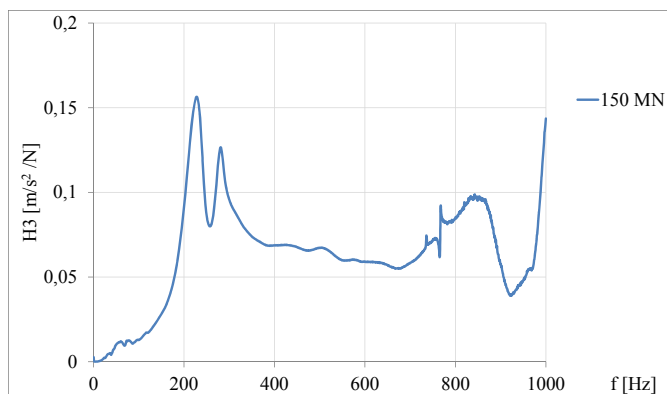


Kolejové lože

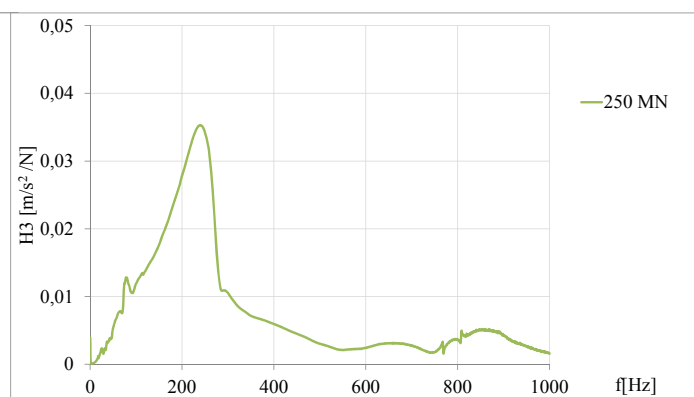
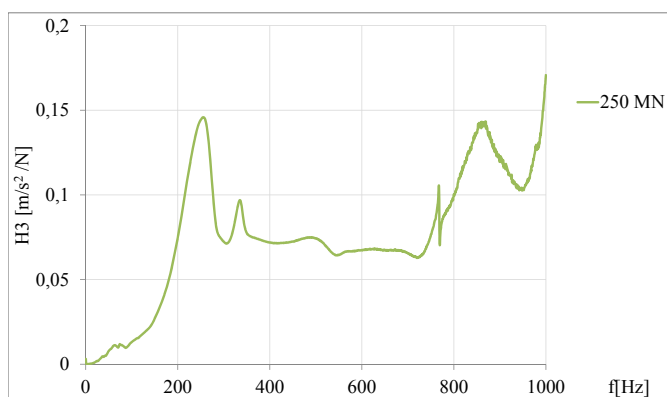
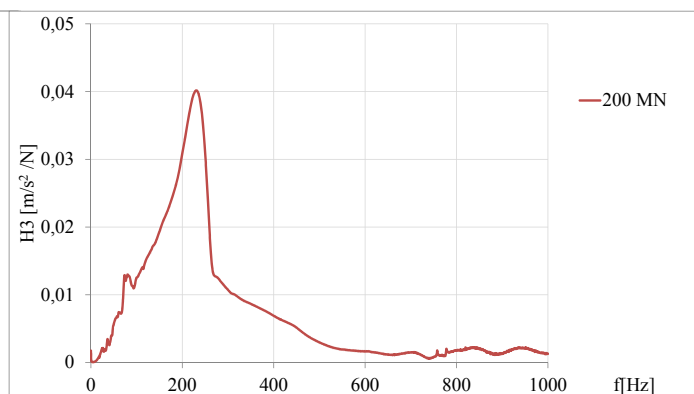
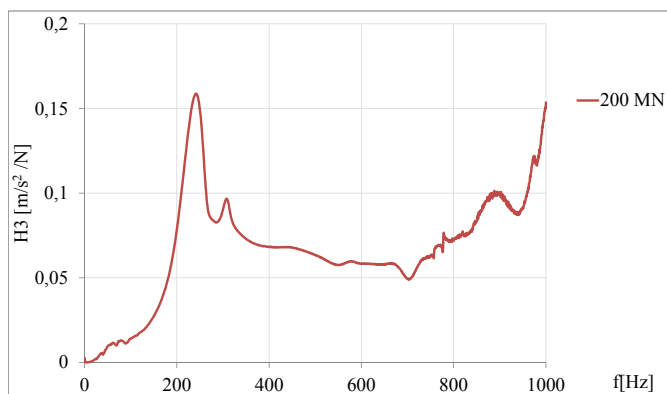
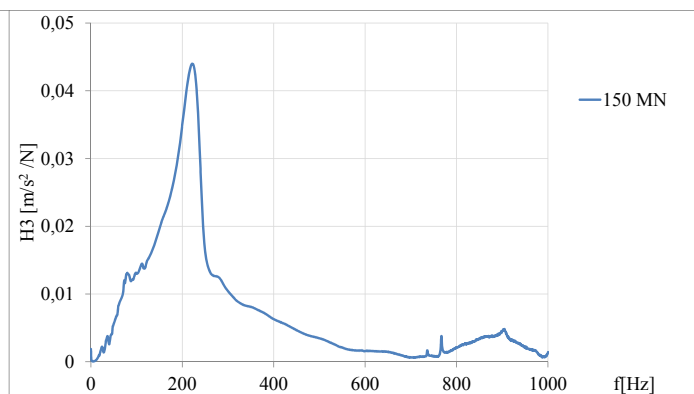


Graf F.4 Sestava průběhu  $H3$  pro srovnání míry dotažení upevnění Vossloh W14 nové; kolejové lože, prolnutí

Signál na kolejnici

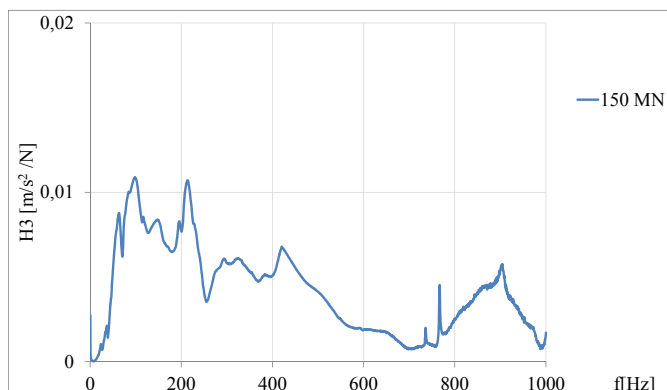


Signál na pražci



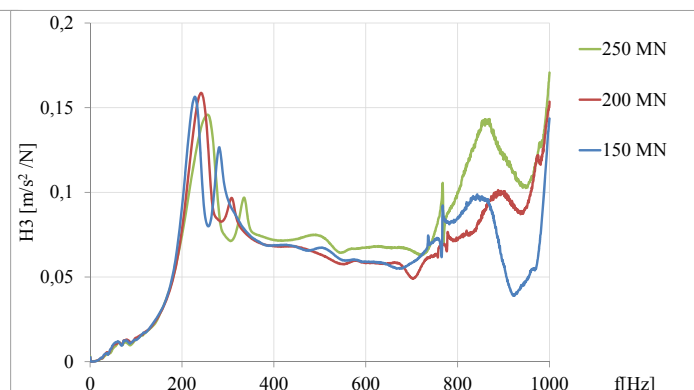
Graf F.5 Sestava průběhu  $H_3$  pro srovnání míry dotažení upevnění Vossloh E14; kolejnice, pražec

Signál v kolejovém loži

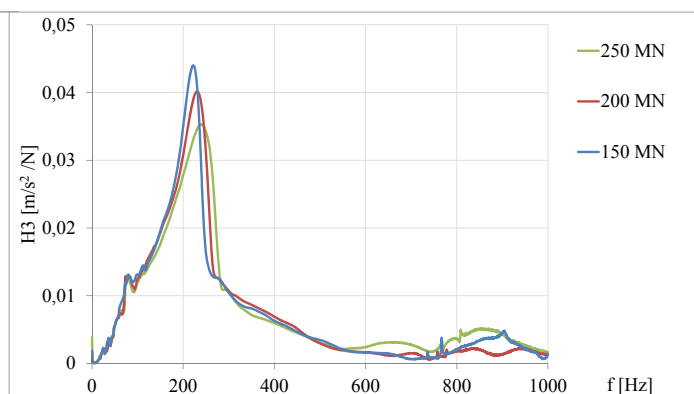
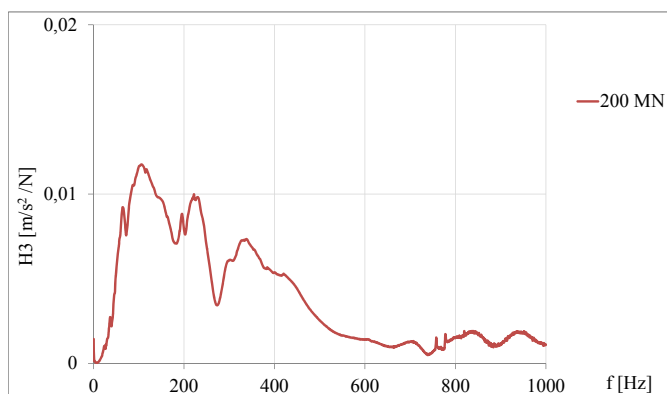


Prolnutí signálů

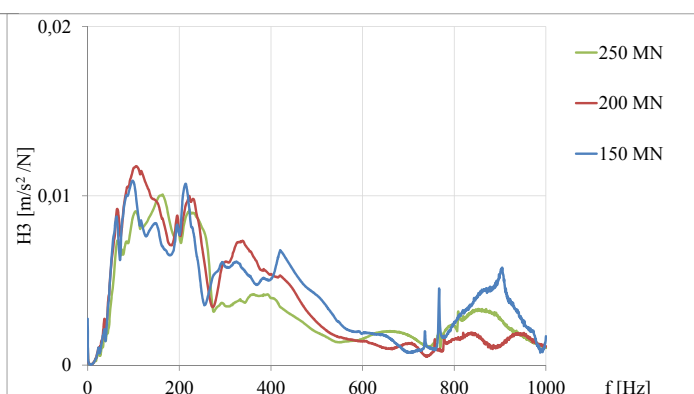
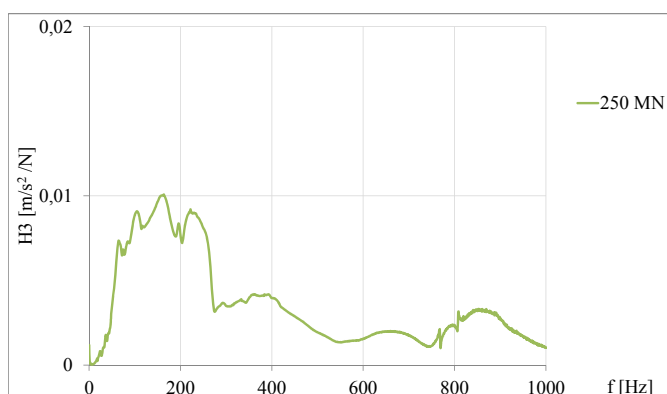
Kolejnice



Pražec

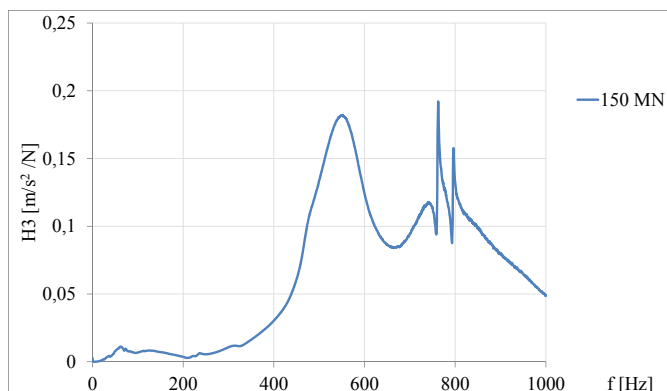


Kolejové lože

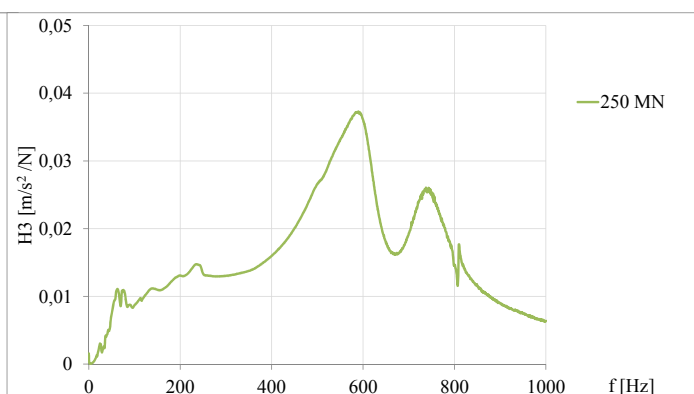
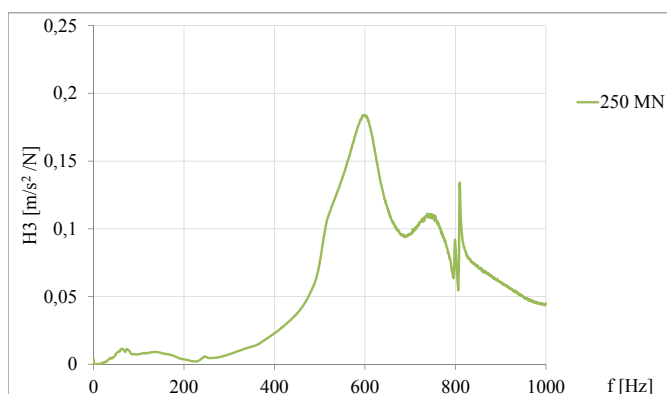
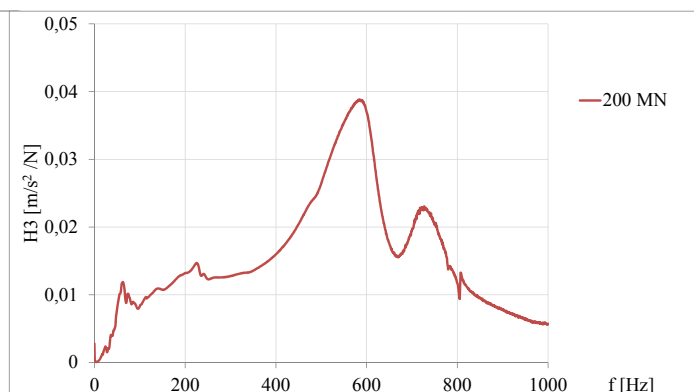
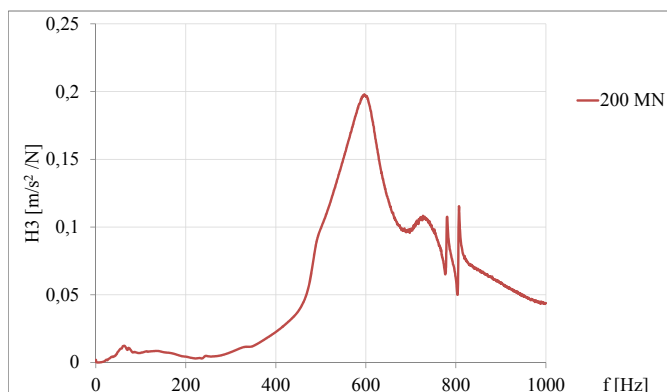
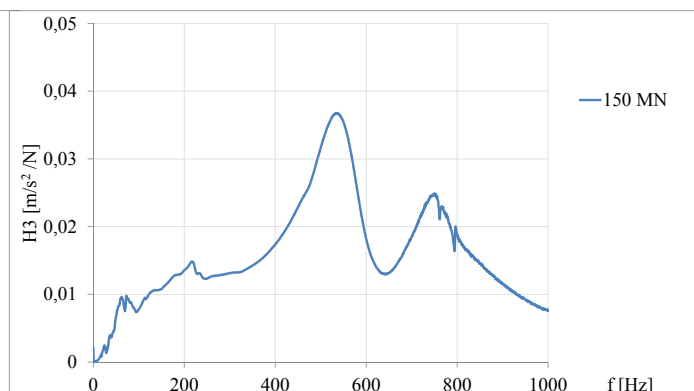


Graf F.6 Sestava průběhu H3 pro srovnání míry dotažení upevnění Vossloh E14; kolejové lože, prolnutí

Signál na kolejnici

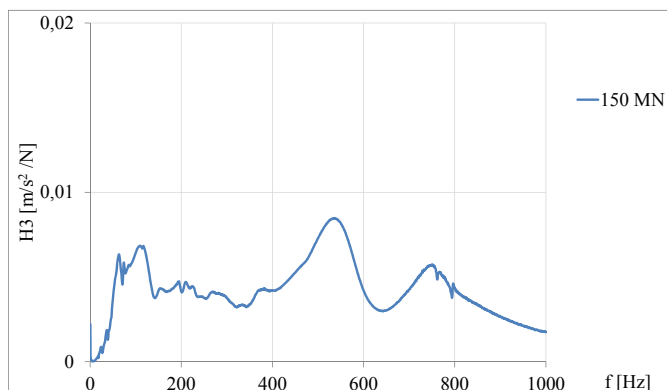


Signál na pražci



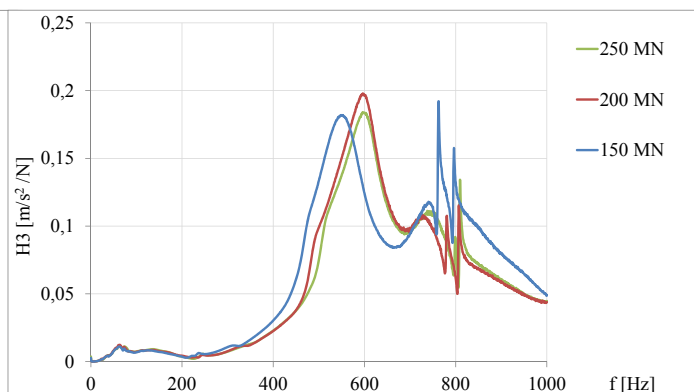
Graf F.7 Sestava průběhu H3 pro srovnání míry dotažení upevnění Vossloh W14NT; kolejnice, pražec

Signál v kolejovém loži

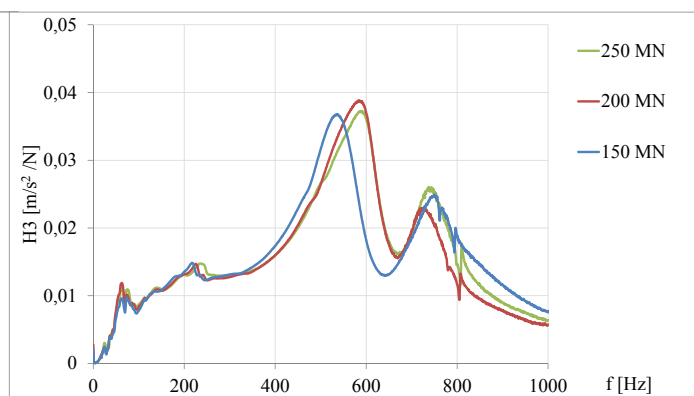
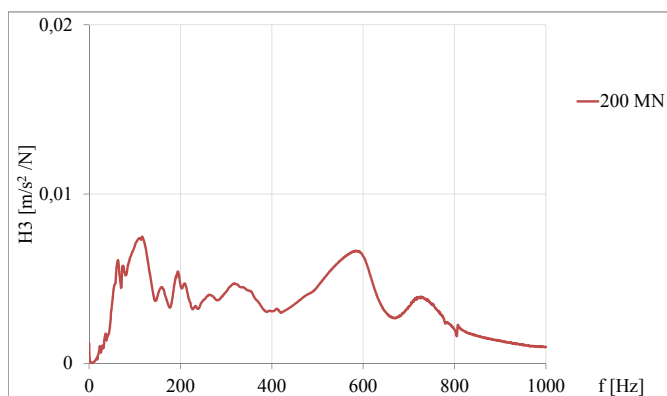


Prolnutí signálů

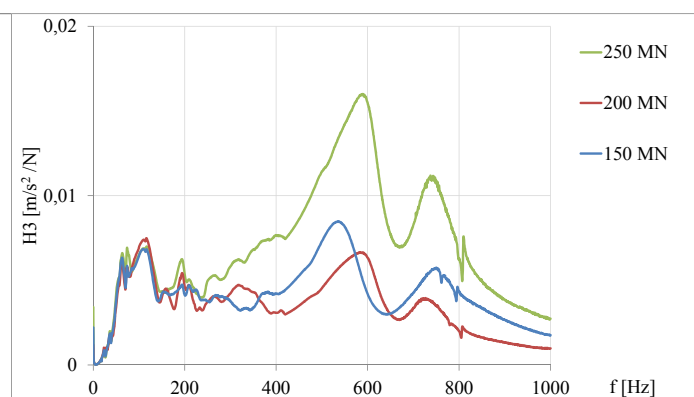
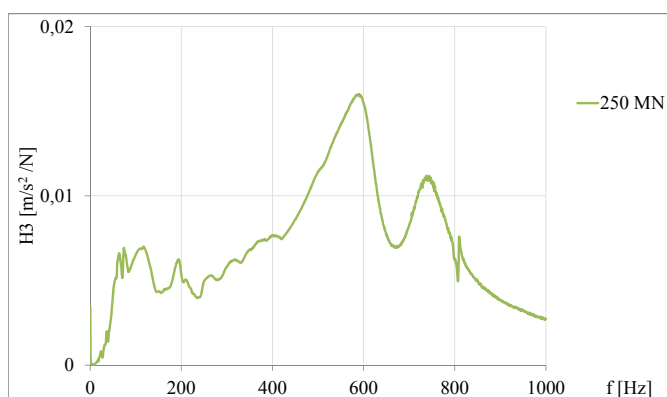
Kolejnice



Pražec

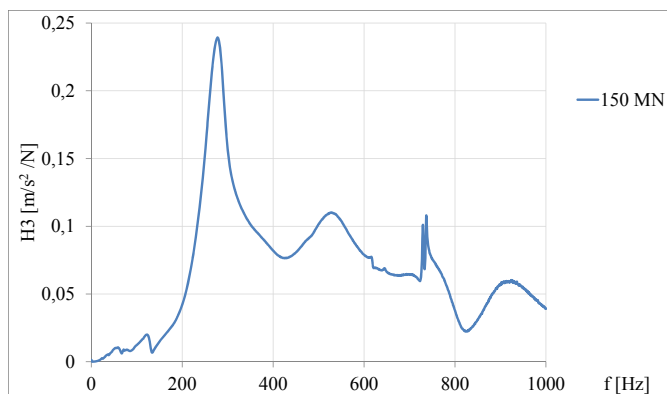


Kolejové lože

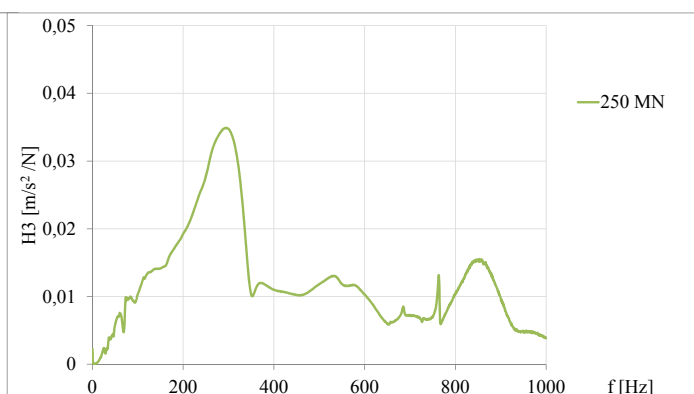
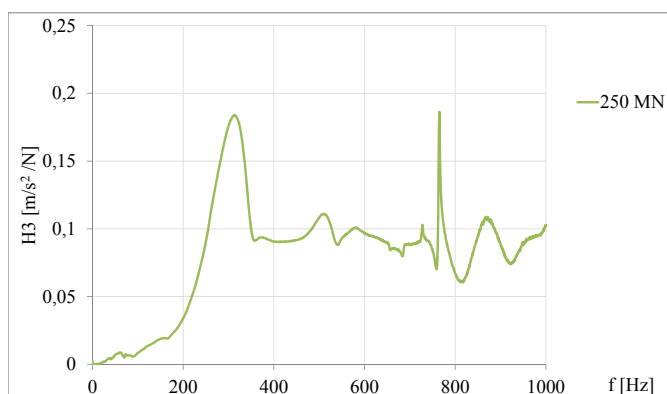
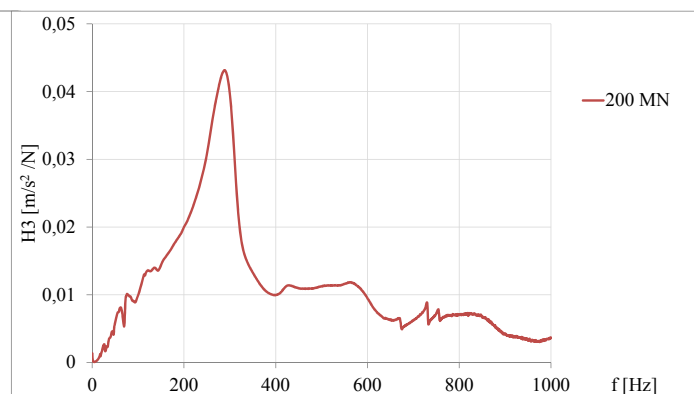
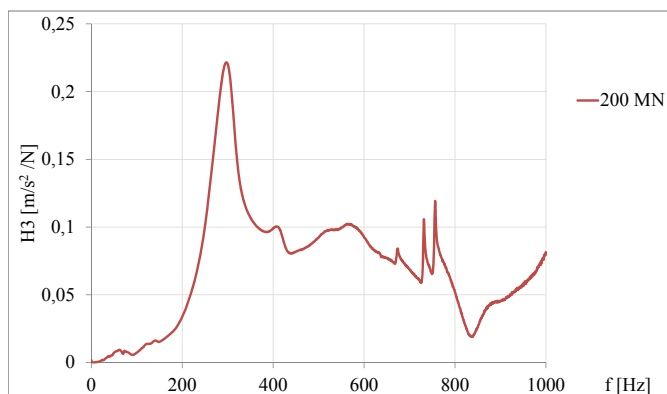
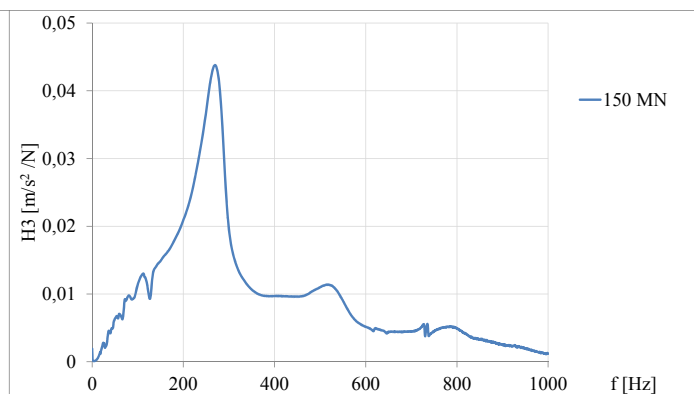


Graf F.8 Sestava průběhu  $H3$  pro srovnání míry dotažení upevnění Vossloh W14NT; kolejové lože, prolnutí

Signál na kolejnici

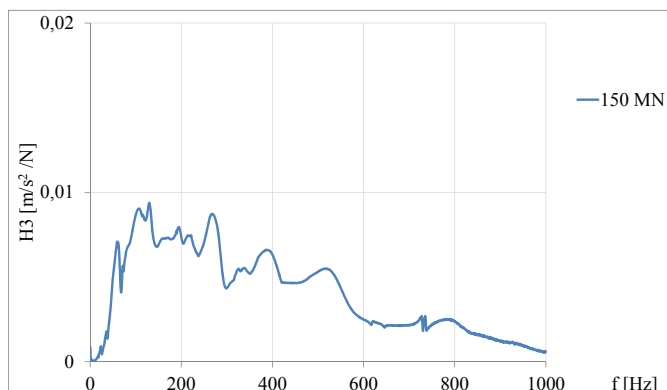


Signál na pražci



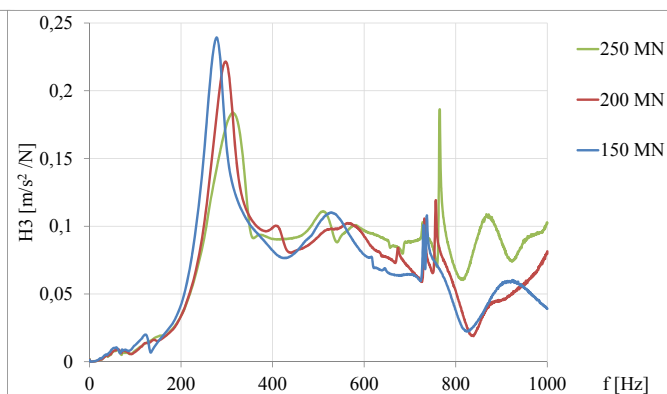
Graf F.9 Sestava průběhu  $H3$  pro srovnání míry dotažení upevnění Vossloh W21; kolejnice, pražec

Signál v kolejovém loži

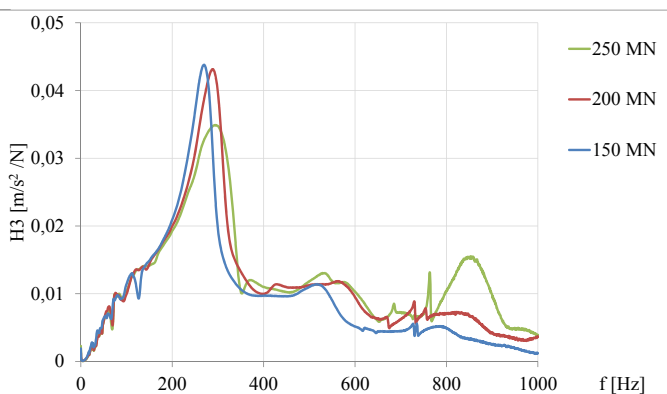
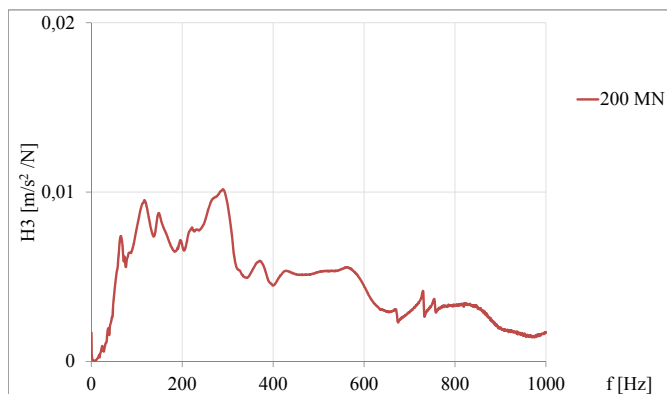


Prolnutí signálů

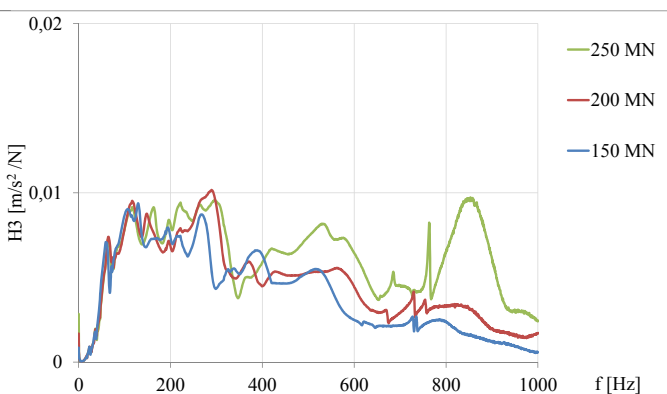
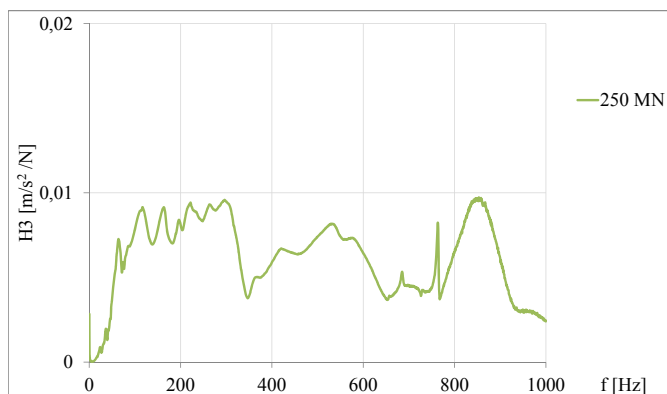
Kolejnice



Pražec



Kolejové lože



Graf F.10 Sestava průběhu  $H_3$  pro srovnání míry dotažení upevnění Vossloh W21; kolejové lože, prolnutí



# PŘÍLOHA G

Tlumení

Tab G.1 Tlumení pro buzení rázem pro upevnění Pandrol FC I

Kolejnice	Frekvence [Hz]	Tlumení [%]	Pražec	Frekvence [Hz]	Tlumení [%]	Kolejové lože	Frekvence [Hz]	Tlumení [%]
	69	3,01		73	3,95		70	2,77
							89	3,16
	167	1,32		114	1,65		198	2,37
	436	3,96		165	2,59		222	1,27
				422	5,63		437	5,25
	573	0,01		651	0,03		733	4,45
	650	0,04		874	0,06		850	0,15
	701	0,10						

Tab G.2 Tlumení pro buzení rázem pro upevnění Vossloh W14

Kolejnice	Frekvence [Hz]	Tlumení [%]	Pražec	Frekvence [Hz]	Tlumení [%]	Kolejové lože	Frekvence [Hz]	Tlumení [%]
	82	1,05		67	2,44		37	3,52
				73	7,57		63	2,18
	114	2,99		117	6,37		163	0,52
	224	0,50					229	4,86
							331	0,52
				519	1,88		411	0,04
	495	5,18		579	1,31		569	0,26
	643	0,02		658	0,09		657	1,34
	780	0,33		776	0,08		750	4,03
	818	0,35		818	0,31		806	0,02

Tab G.3 Tlumení pro buzení rázem pro upevnění Vossloh W14 nové

Kolejnice	Frekvence [Hz]	Tlumení [%]	Pražec	Frekvence [Hz]	Tlumení [%]	Kolejové lože	Frekvence [Hz]	Tlumení [%]
	72	2,32		74	6,07		40	1,58
				96	3,15		72	4,53
							85	2,24
	128	2,29		112	3,66		146	4,23
				215	3,10		222	0,32
	497	0,35		499	6,94		500	0,37
	646	0,17		633	0,54		699	0,24
	772	0,30		772	0,29		751	0,09
	830	0,24		831	0,22		821	0,10
	905	0,04		834	0,03			

Tab G.4 Tlumení pro buzení rázem pro upevnění Vossloh E14

Kolejnice	Frekvence [Hz]	Tlumení [%]	Pražec	Frekvence [Hz]	Tlumení [%]	Kolejové lože	Frekvence [Hz]	Tlumení [%]
	70	0,78		48	4,37		75	7,06
				71	5,38			
	119	3,60		131	2,10		133	4,35
	233	6,79		241	5,21		265	8,44
	302	2,68					369	6,95
	548	0,03		482	0,12		441	0,14
	684	0,04		610	0,37		738	0,01
	757	0,06		683	0,01		772	0,32
				835	0,00		869	0,07
				925	0,03		925	0,00

Tab G.5 Tlumení pro buzení rázem pro upevnění Vossloh W14NT

Kolejnice	Frekvence [Hz]	Tlumení [%]	Pražec	Frekvence [Hz]	Tlumení [%]	Kolejové lože	Frekvence [Hz]	Tlumení [%]
	83	5,30		78	3,09		71	2,66
	157	4,55		152	3,51		130	1,62
	241	2,46		230	3,17		183	1,24
	339	4,81					204	3,84
							278	4,23
							341	3,24
							410	0,47
	571	0,09		572	1,09		504	0,24
	728	0,02		732	0,15		599	2,55
	779	0,22		805	0,16		696	0,03
	805	0,18						

Tab G.6 Tlumení pro buzení rázem pro upevnění Vossloh W21

Kolejnice	Frekvence [Hz]	Tlumení [%]	Pražec	Frekvence [Hz]	Tlumení [%]	Kolejové lože	Frekvence [Hz]	Tlumení [%]
	73	1,43		32	4,35		87	2,40
				74	9,29			
	145	4,72		129	6,63		299	7,94
	289	8,00		293	8,65			
	417	3,34		417	3,50			
	561	4,39		672	0,41		442	4,52
	673	0,43		730	0,23		565	4,71
	730	0,28		756	0,30		672	0,43
	757	0,08		911	0,10		739	3,42
	861	0,72					754	0,23

pásmo 0Hz-80Hz  
 pásmo 80Hz-400Hz  
 pásmo 400Hz-1000Hz

hodnoty pro srovnání

Tab G.7 Tlumení pro buzení rázem v terénu pro upevnění Pandrol FC I

Kolejnice	Frekvence [Hz]	Tlumení [%]	Pražec	Frekvence [Hz]	Tlumení [%]
	83	3,25		64	2,09
				147	7,68
	277	3,12		278	4,59
	359	0,35			
	518	0,58		591	0,07
	774	0,53		773	0,06
	931	0,10		798	0,08

Tab G.8 Tlumení pro buzení rázem v terénu pro upevnění Vossloh W14

Kolejnice	Frekvence [Hz]	Tlumení [%]	Pražec	Frekvence [Hz]	Tlumení [%]
	119	1,02		149	6,15
				305	0,27
	595	0,58		473	0,10
	752	0,01		583	0,05
	781	0,99		792	0,12
	802	1,79		803	0,02
	906	0,02			

	pásmo 0Hz-80Hz
	pásmo 80Hz-400Hz
	pásmo 400Hz-1000Hz
	hodnoty pro srovnání

Tab G.9 Tlumení pro buzení elektrodynamickým budičem pro upevnění Pandrol FC I

Kolejnice	Frekvence [Hz]	Tlumení [%]	Pražec	Frekvence [Hz]	Tlumení [%]	Kolejové lože	Frekvence [Hz]	Tlumení [%]
	98	3,95		107	4,14		77	4,50
	399	4,70		144	5,38		119	3,14
				380	8,94		233	0,93
							383	0,64
	429	1,44		420	0,53			
	538	0,75		558	0,89		481	0,27
	557	0,83		586	0,82		628	1,17
	569	0,93		601	0,96			
	836	0,70						
	938	0,66						

Tab G.10 Tlumení pro buzení elektrodynamickým budičem pro upevnění Vossloh W14

Kolejnice	Frekvence [Hz]	Tlumení [%]	Pražec	Frekvence [Hz]	Tlumení [%]	Kolejové lože	Frekvence [Hz]	Tlumení [%]
				75	2,60		75	4,25
							110	3,95
							221	5,58
							290	2,40
							384	1,21
	490	0,93		490	0,82		490	0,85
	550	1,64		520	1,15		533	1,43
	559	0,66		556	1,27		614	0,31
	610	4,61		600	0,74			
	802	0,33						
	938	0,57						

Tab G.11 Tlumení pro buzení elektrodynamickým budičem pro upevnění Vossloh W14 nové

Kolejnice	Frekvence [Hz]	Tlumení [%]	Pražec	Frekvence [Hz]	Tlumení [%]	Kolejové lože	Frekvence [Hz]	Tlumení [%]
				58	4,02		41	5,62
							82	8,87
				179	1,98		116	8,77
							153	6,34
							276	1,48
							361	4,96
	553	1,24		532	0,98		451	4,97
	583	1,01		558	0,91		556	0,63
	626	1,05		583	0,97		602	0,80
	788	0,58		789	0,60			
	833	0,36		619	5,61			

Tab G.12 Tlumení pro buzení elektrodynamickým budičem pro upevnění Vossloh E14

Kolejnice	Frekvence [Hz]	Tlumení [%]	Pražec	Frekvence [Hz]	Tlumení [%]	Kolejové lože	Frekvence [Hz]	Tlumení [%]
				72	2,59		64	3,07
	223	3,58		124	3,99		123	3,41
	273	0,53		236	2,31		135	2,92
							223	4,69
	419	1,42					276	0,61
	529	1,79		589	0,53		477	0,18
	562	0,41		738	0,10		788	0,35
	722	0,25						
	938	0,57						

Tab G.13 Tlumení pro buzení elektrodynamickým budičem pro upevnění Vossloh W14NT

Kolejnice	Frekvence [Hz]	Tlumení [%]	Pražec	Frekvence [Hz]	Tlumení [%]	Kolejové lože	Frekvence [Hz]	Tlumení [%]
							75	1,69
							111	6,24
							145	9,99
							197	1,80
							342	5,32
							418	2,54
	449	2,68		490	0,84		444	3,50
	537	0,83		514	2,40		516	1,65
	554	1,15		532	0,69		530	0,99
	584	0,96		551	0,91		552	0,86
	600	0,59		579	1,49			
	789	0,36		601	0,71			
	804	0,37						

Tab G.14 Tlumení pro buzení elektrodynamickým budičem pro upevnění Vossloh W21

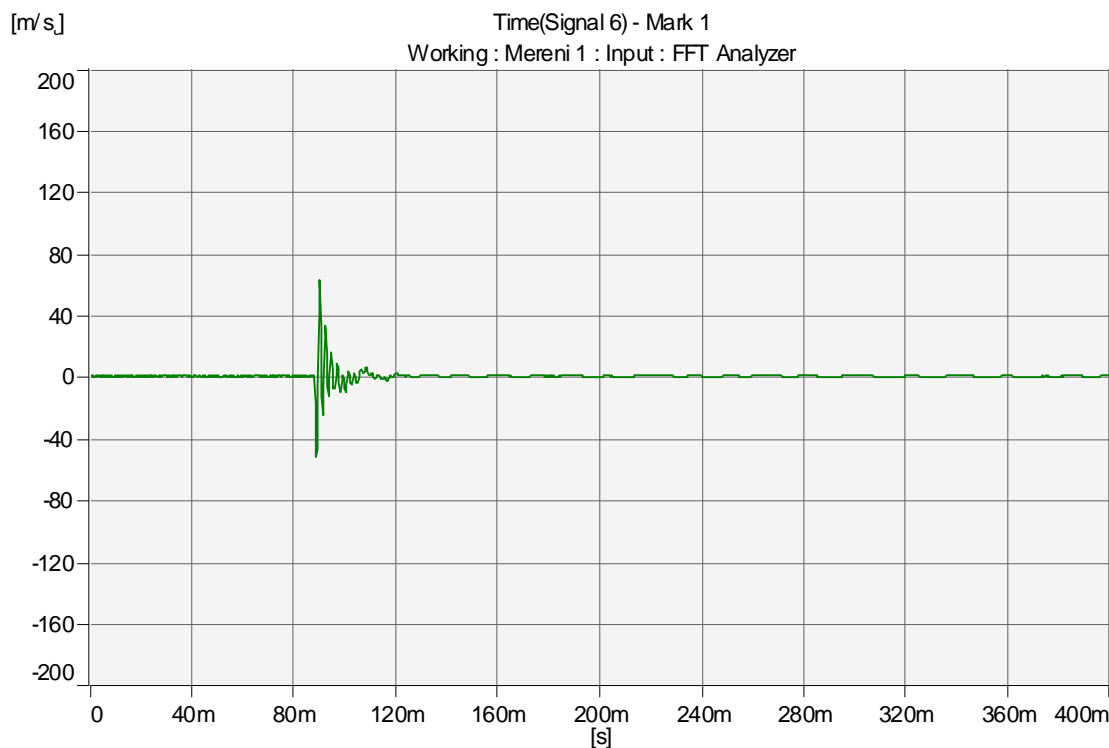
Kolejnice	Frekvence [Hz]	Tlumení [%]	Pražec	Frekvence [Hz]	Tlumení [%]	Kolejové lože	Frekvence [Hz]	Tlumení [%]
				60	3,05		73	4,80
							105	5,35
	295	6,45		141	2,93		135	2,68
				292	3,89		295	6,78
	559	0,67		465	0,93		596	0,58
	610	1,93		615	0,38		891	0,09
	739	0,54		744	0,70			
	834	0,68						
	938	0,52						

	pásmo 0Hz-80Hz
	pásmo 80Hz-400Hz
	pásmo 400Hz-1000Hz

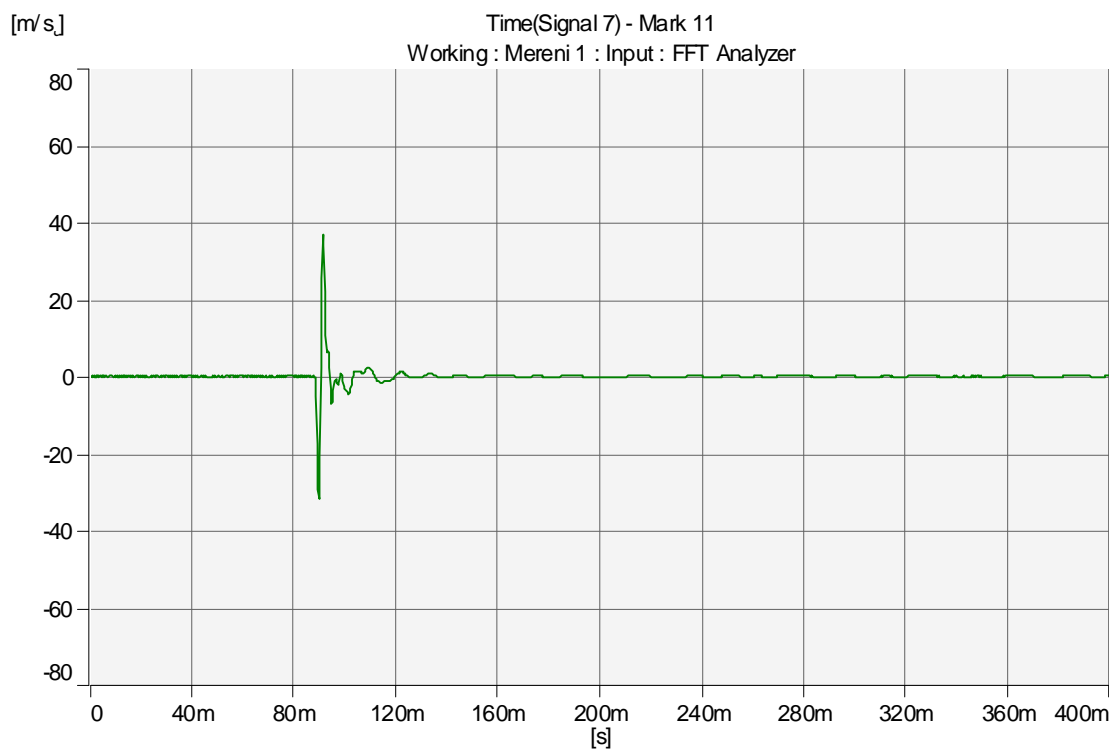
hodnoty pro srovnání

# **PŘÍLOHA H**

Vyhodnocení v časové oblasti

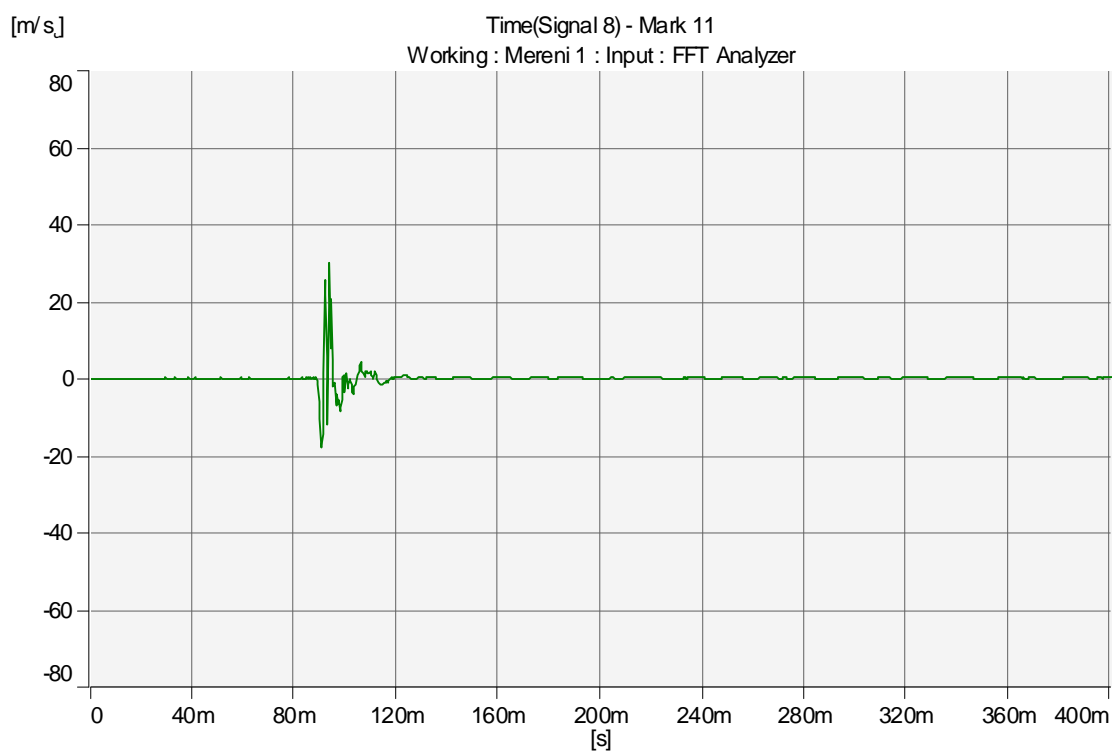


*Graf H.1 Časová analýza; upevnění Pandrol FC I; snímač na kolejnici; buzení rázem*

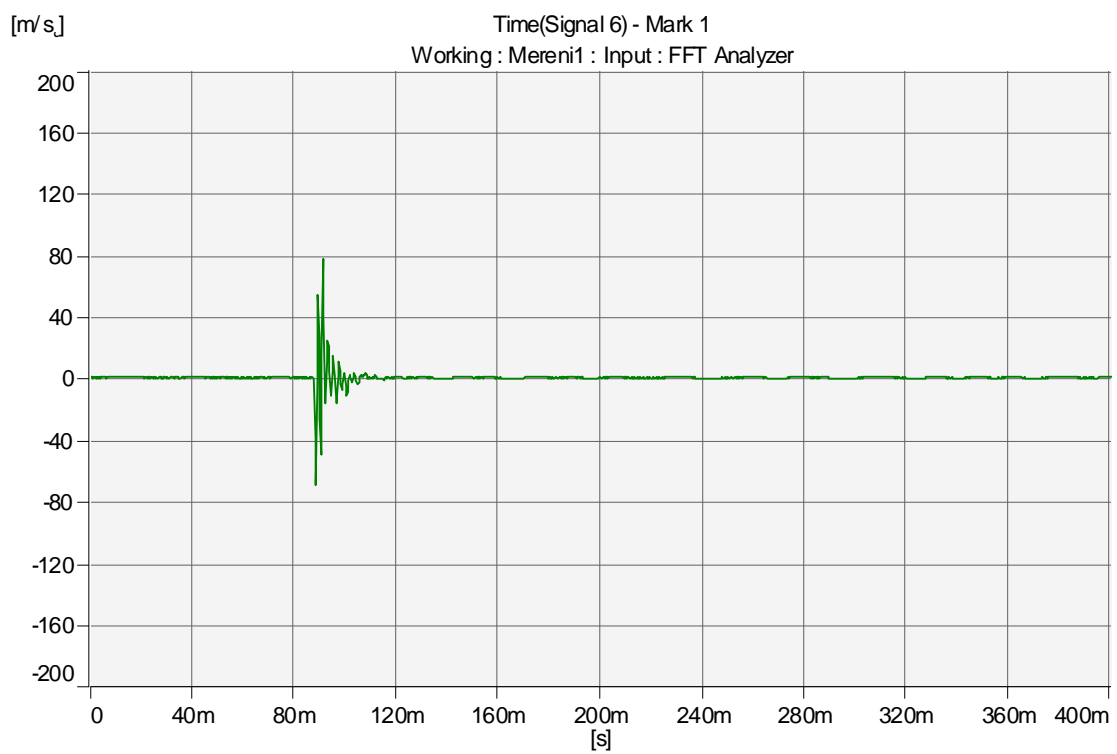


*Graf H.2 Časová analýza; upevnění Pandrol FC I; snímač na pražci; buzení rázem*

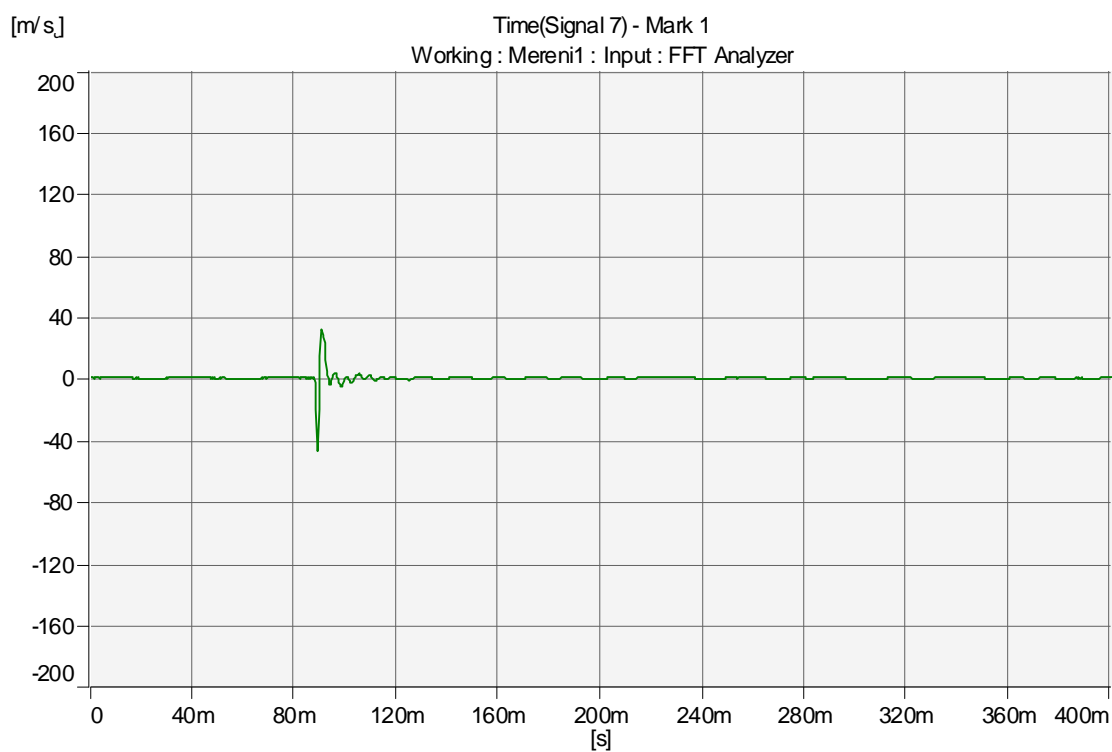




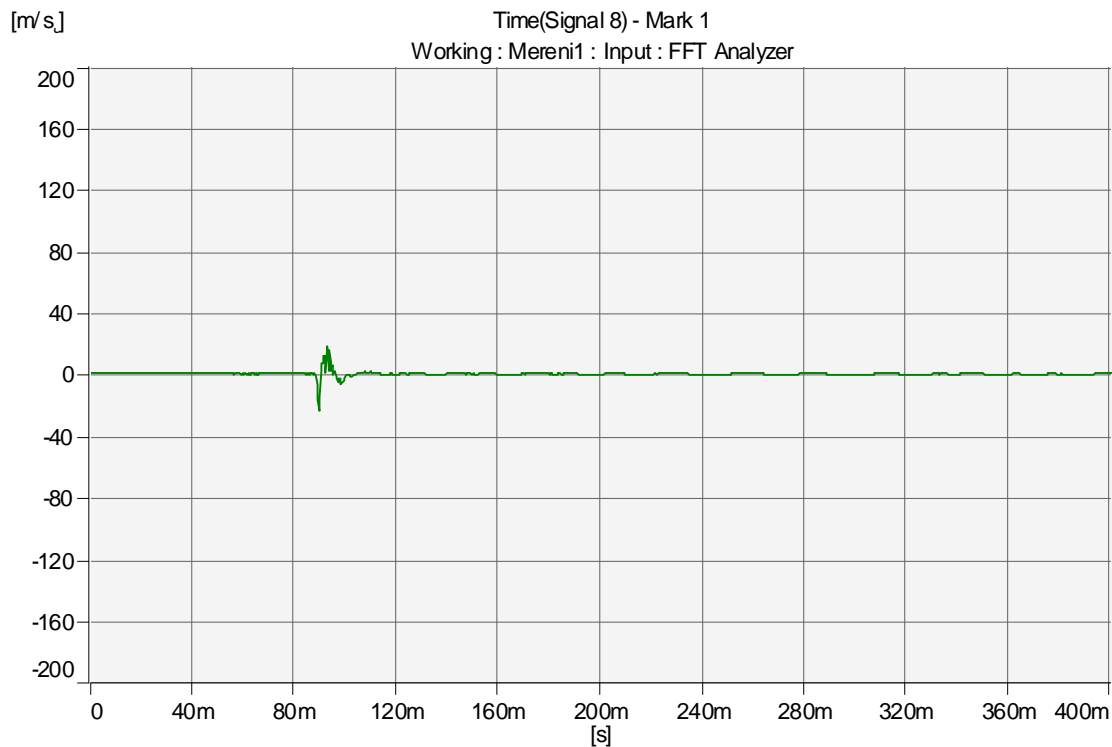
*Graf H.3 Časová analýza; upevnění Pandrol FC I; snímač v kolejovém loži; buzení rázem*



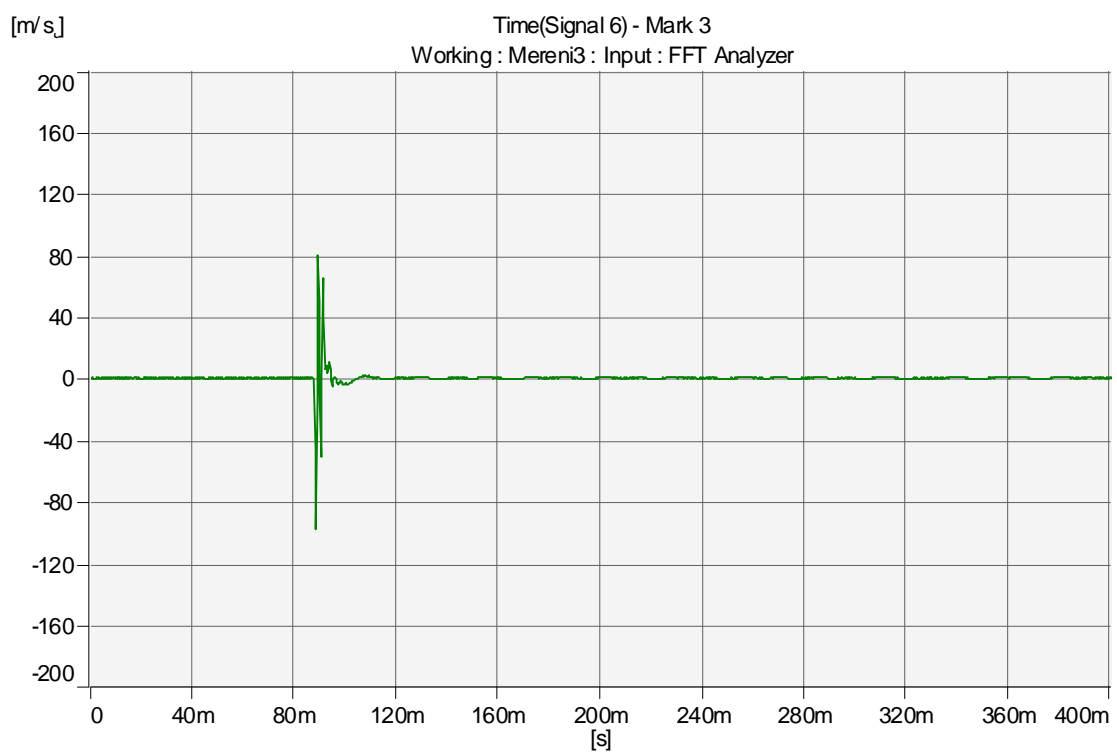
*Graf H.4 Časová analýza; upevnění Vossloh W 14; snímač na kolejnici; buzení rázem*



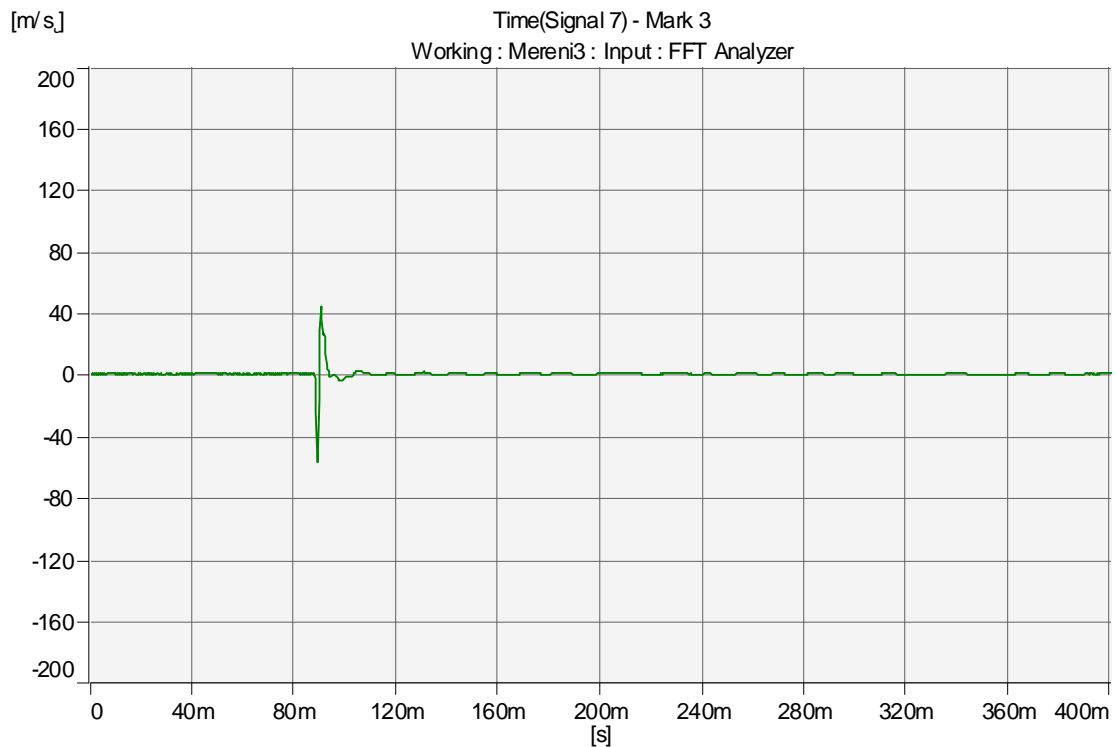
*Graf H.5 Časová analýza; upevnění Vossloh W 14; snímač na pražci; buzení rázem*



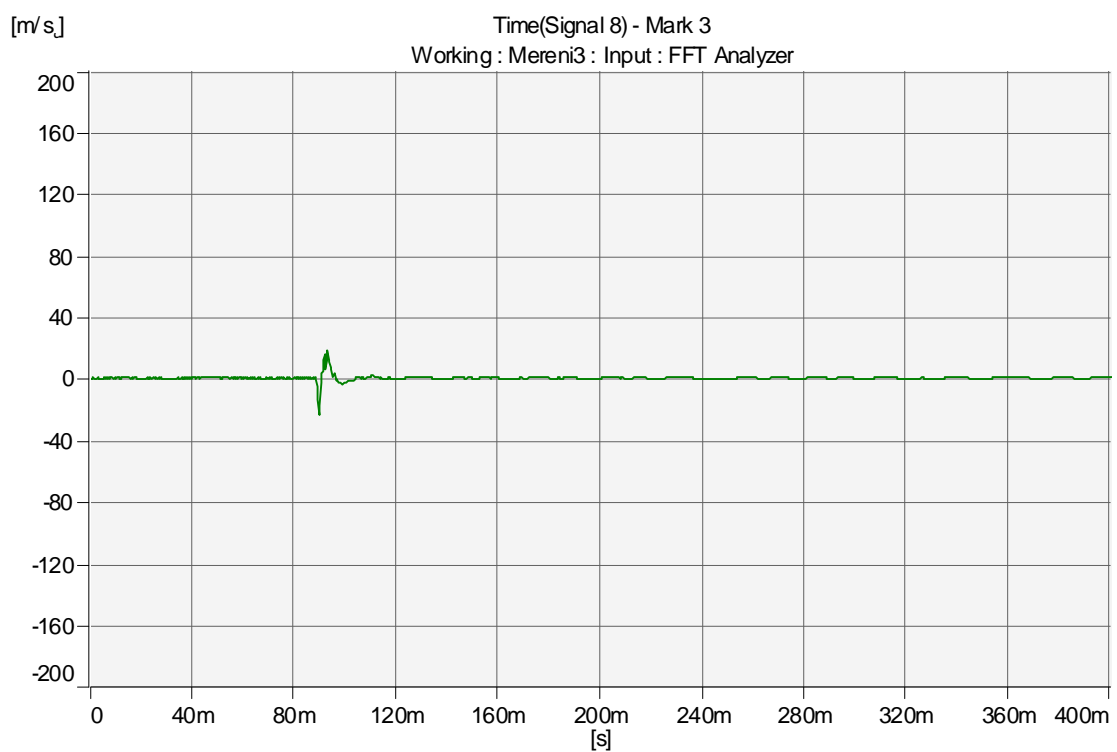
*Graf H.6 Časová analýza; upevnění Vossloh W14; snímač v kolejovém loži; buzení rázem*



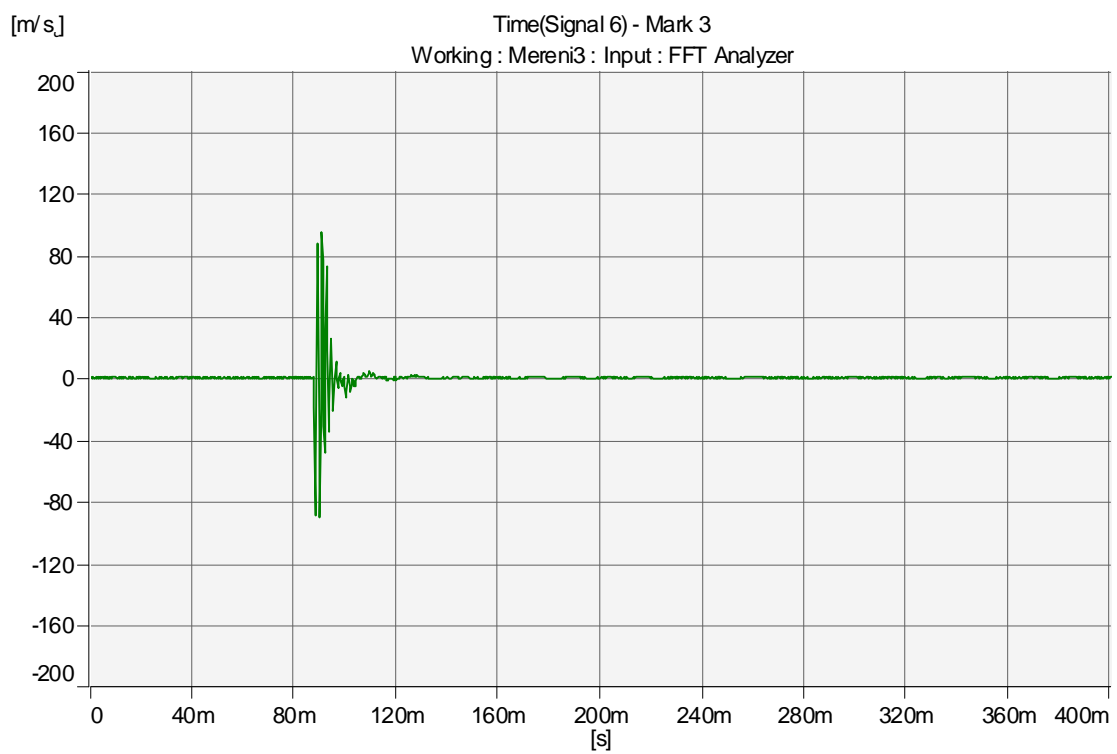
*Graf H.7 Časová analýza; upevnění Vossloh W14 nové ;snímač na kolejnici; buzení rázem*



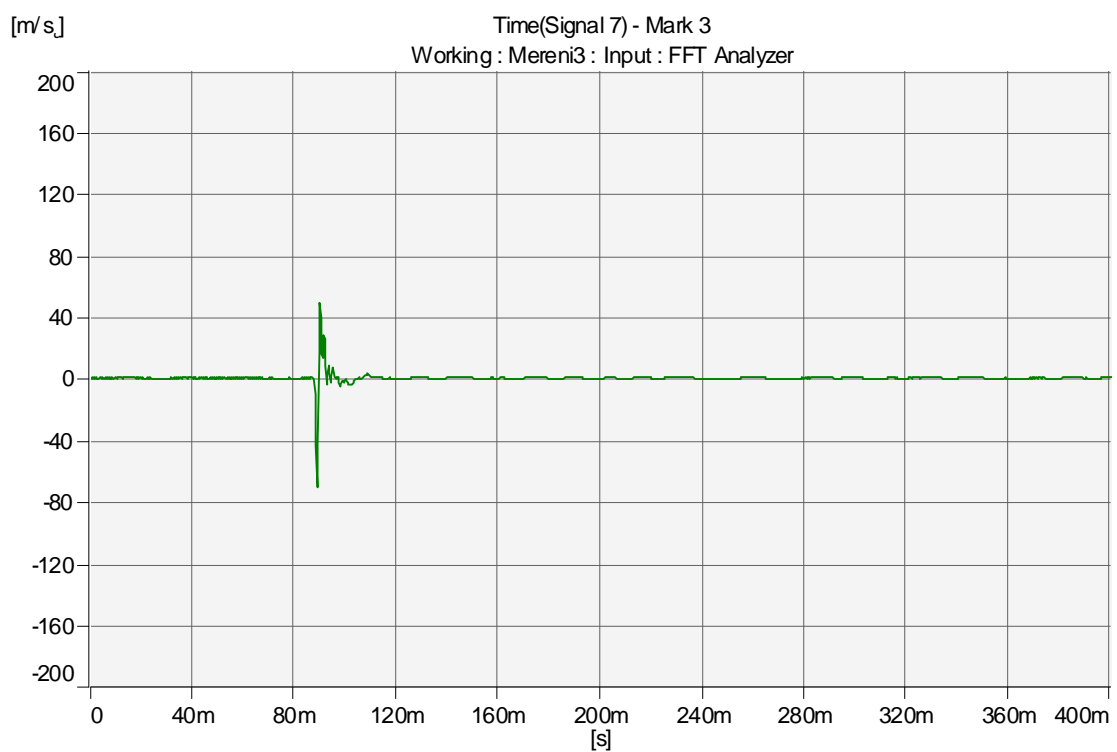
*Graf H.8 Časová analýza; upevnění Vossloh W14 nové; snímač na pražci; buzení rázem*



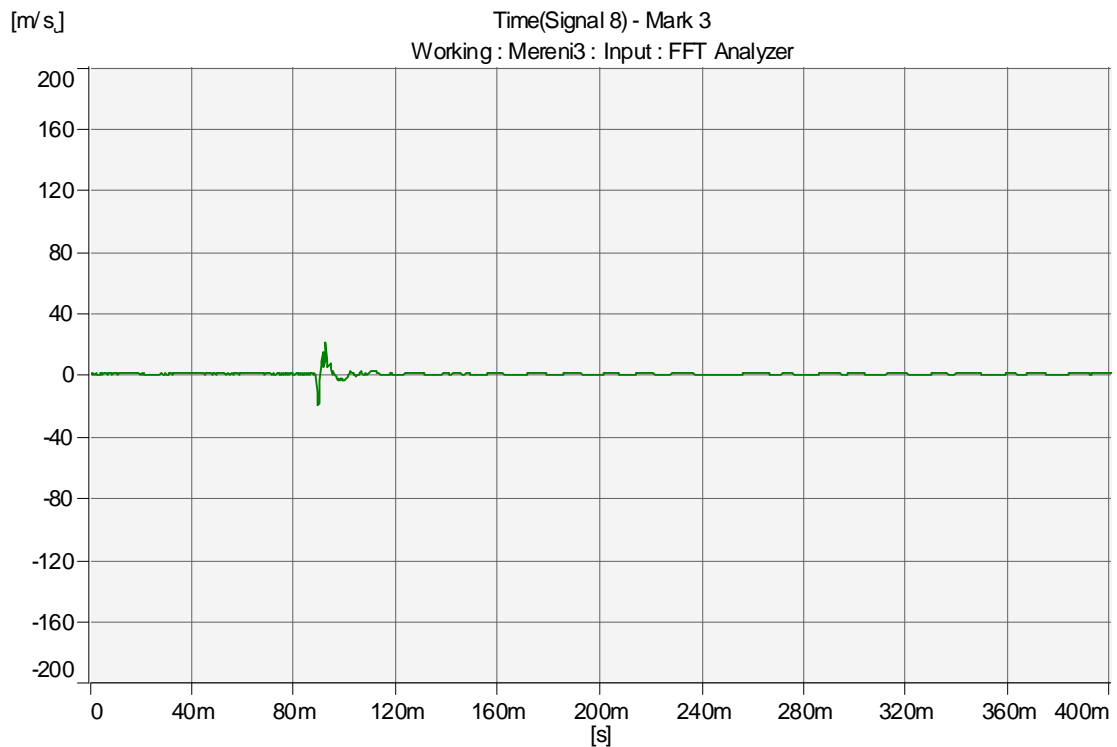
*Graf H.9 Časová analýza; upevnění Vossloh W14 nové; snímač v kolejovém loži; buzení rázem*



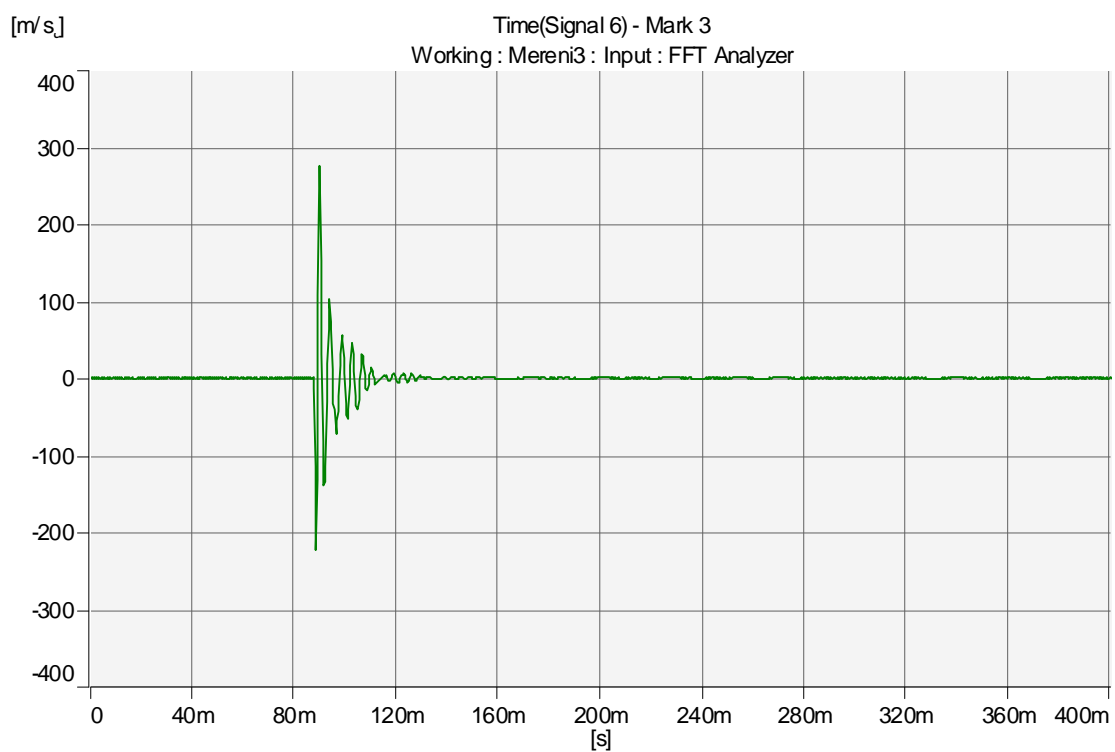
*Graf H.10 Časová analýza; upevnění Vossloh W 14NT ;snímač na kolejnici; buzení rázem*



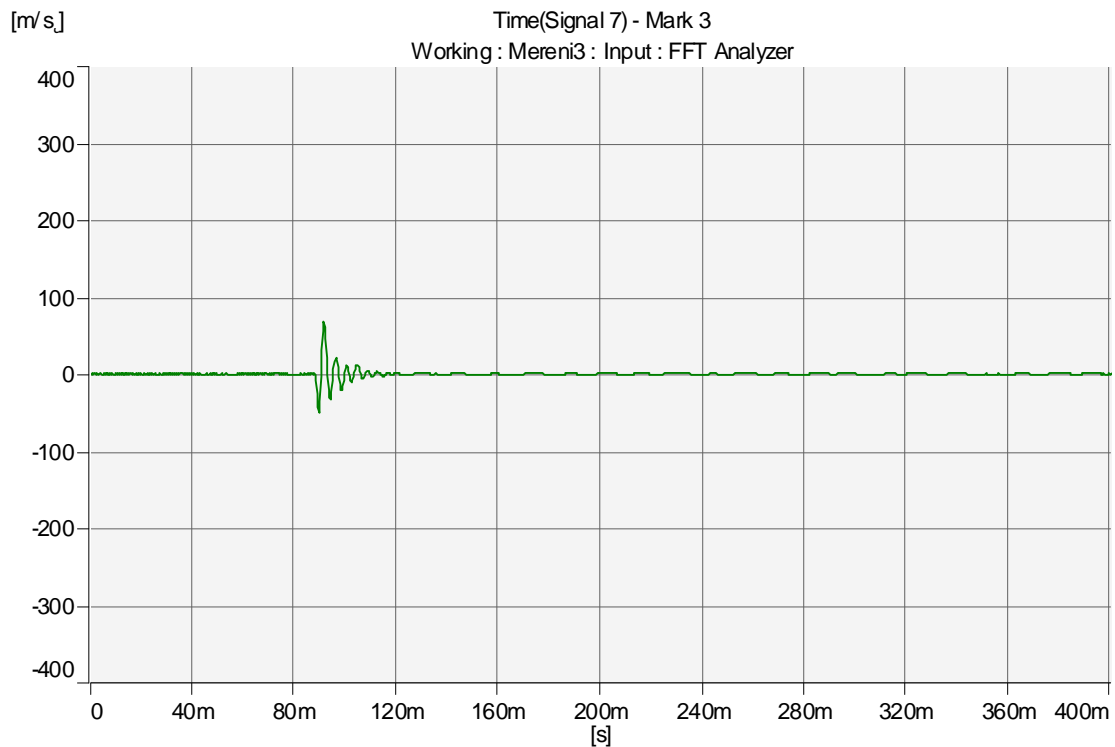
*Graf H.11 Časová analýza; upevnění Vossloh W 14NT; snímač na pražci; buzení rázem*



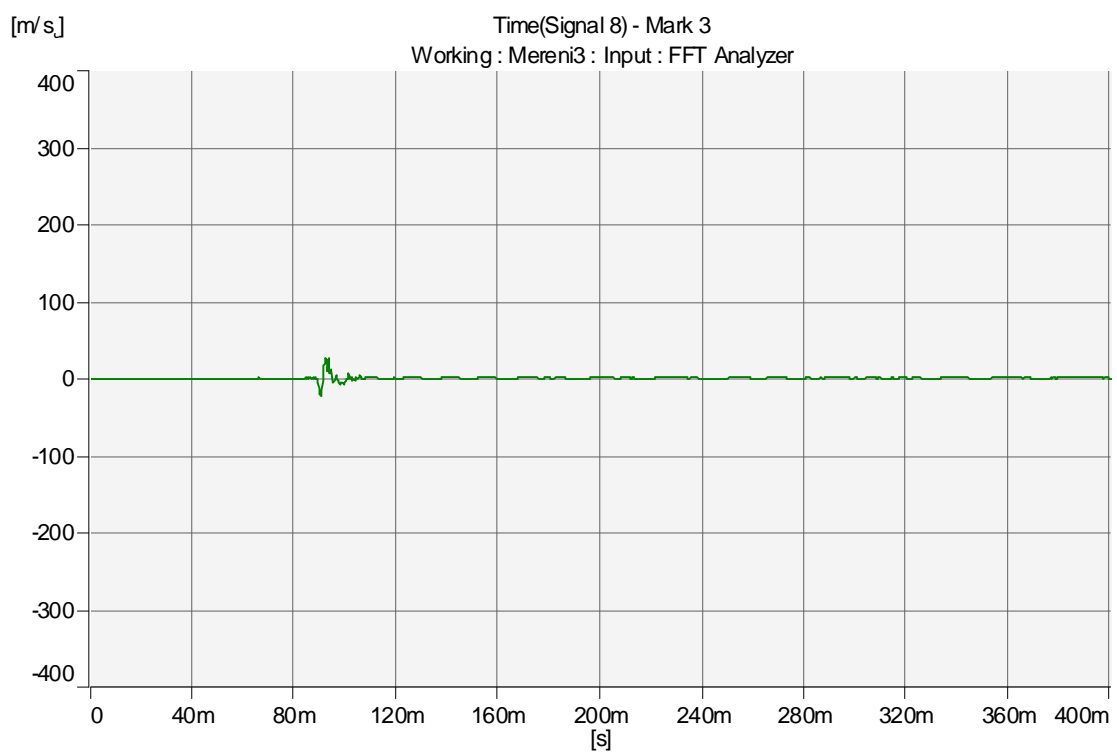
*Graf H.12 Časová analýza; upevnění Vossloh W 14NT; snímač v kolejovém loži; buzení rázem*



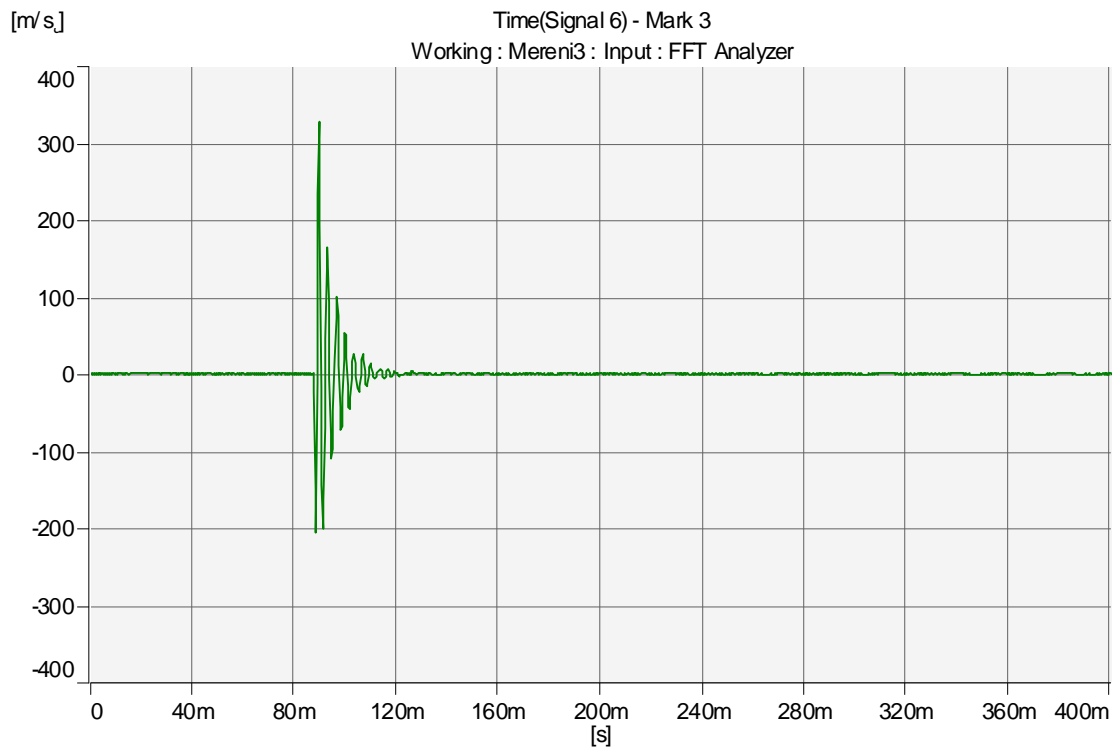
*Graf H.16 Časová analýza; upevnění Vossloh E 14 ;snímač na kolejnici; buzení rázem*



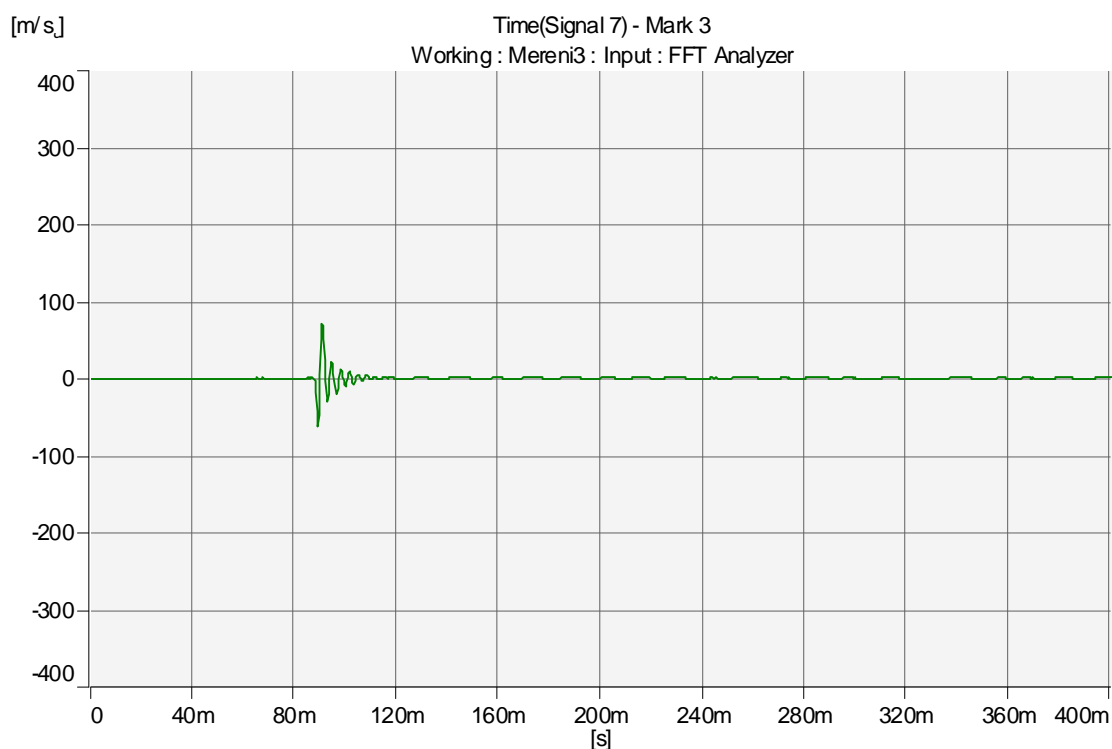
*Graf H.17 Časová analýza; upevnění Vossloh E 14; snímač na pražci; buzení rázem*



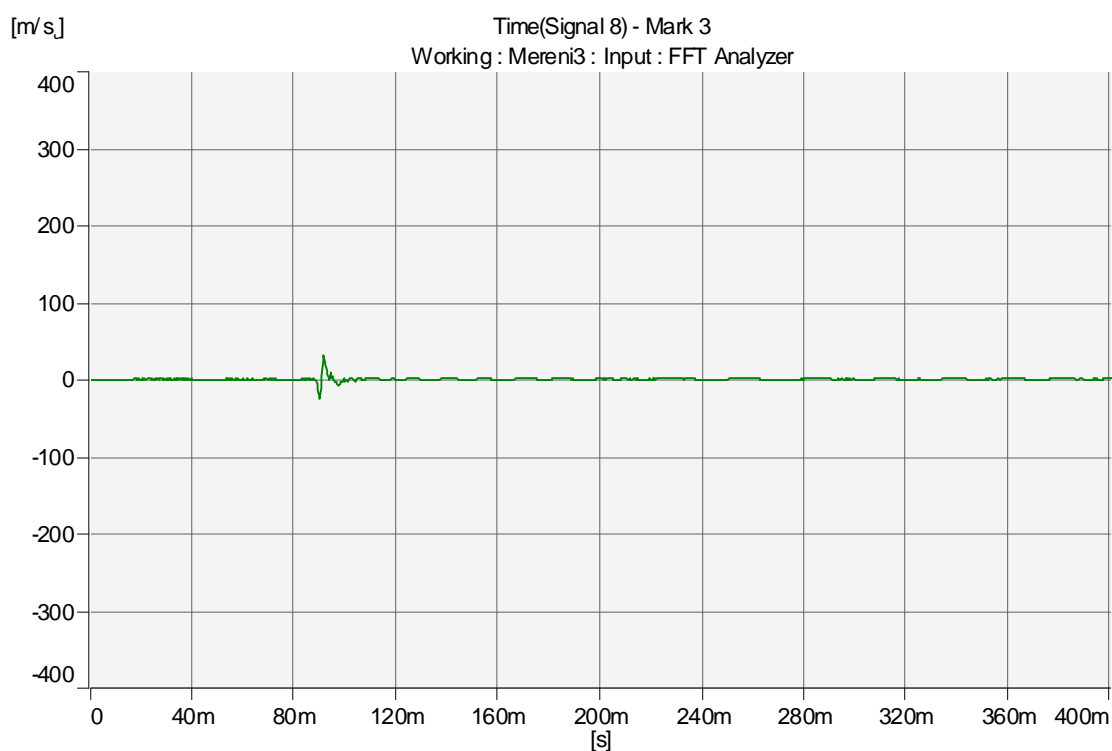
*Graf H.18 Časová analýza; upevnění Vossloh E 14; snímač v kolejovém loži; buzení rázem*



*Graf H.13 Časová analýza; upevnění Vossloh W 21 ;snímač na kolejnici; buzení rázem*

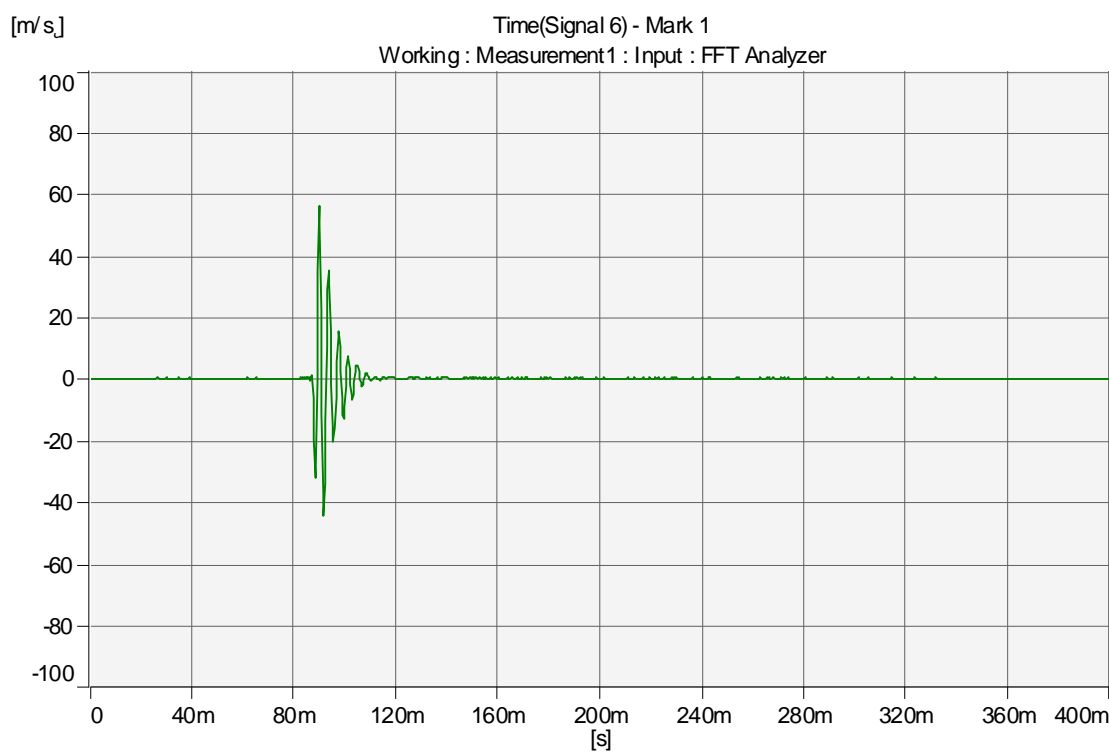


*Graf H.14 Časová analýza; upevnění Vossloh W 21; snímač na pražci; buzení rázem*

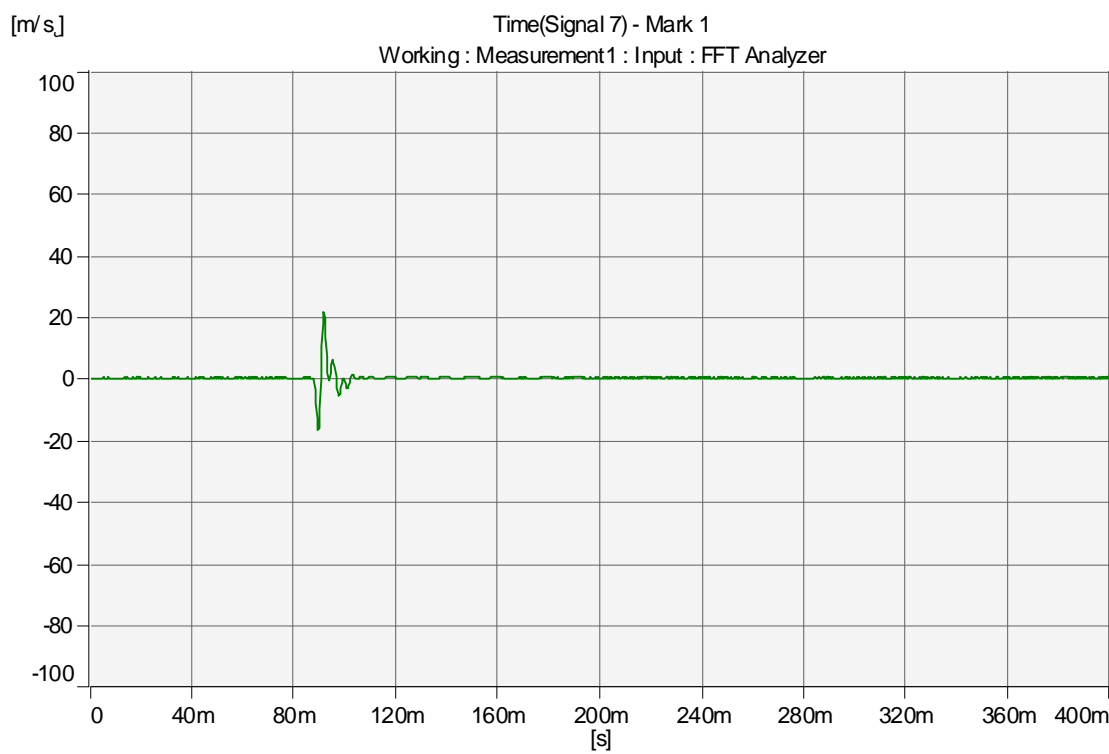


*Graf H.15 Časová analýza; upevnění Vossloh W 21; snímač v kolejovém loži; buzení rázem*

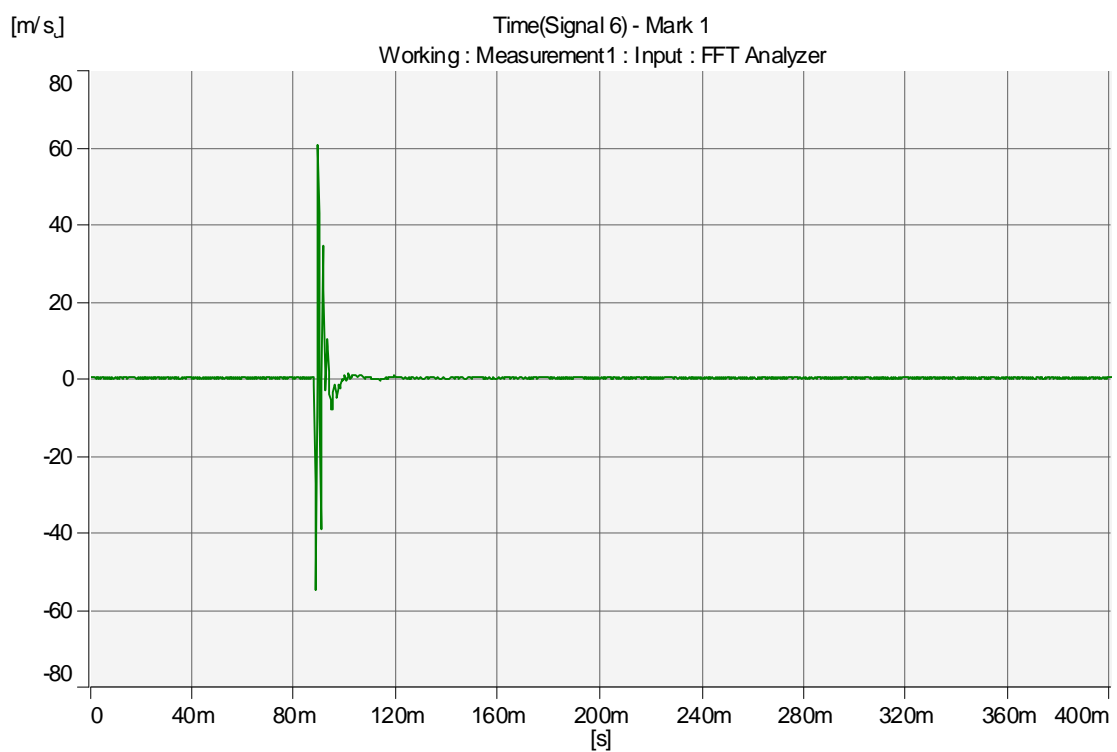




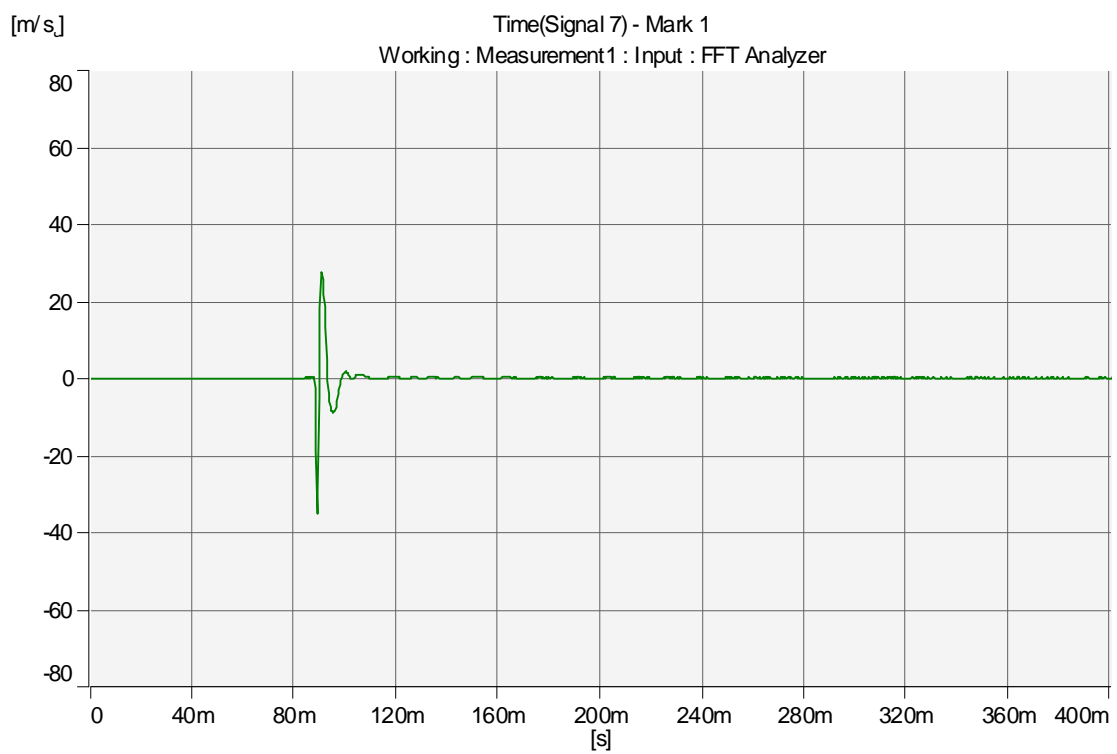
*Graf H.19 Časová analýza; upevnění Pandrol FC I; snímač na kolejnici; buzení rázem v terénu*



*Graf H.20 Časová analýza; upevnění Pandrol FC I; snímač na pražci; buzení rázem v terénu*



*Graf H.21 Časová analýza; upevnění Vossloh W 14; snímač na kolejnici; buzení rázem v terénu*



*Graf H.22 Časová analýza; upevnění Vossloh W 14; snímač na pražci; buzení rázem v terénu*



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
FAKULTA STAVEBNÍ

## POPISNÝ SOUBOR ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

**Vedoucí práce** prof. Ing. Jaroslav Smutný, Ph.D.  
**Autor práce** Adam Podolník

**Škola** Vysoké učení technické v Brně  
**Fakulta** Stavební  
**Ústav** Ústav železničních konstrukcí a staveb  
**Studijní obor** 3647R013 Konstrukce a dopravní stavby  
**Studijní program** B3607 Stavební inženýrství

**Název práce** Měření dynamických parametrů součástí kolejového roštu  
**Název práce v anglickém jazyce** MEASUREMENT OF DYNAMIC PARAMETERS OF TRACK GRID  
**Typ práce** Bakalářská práce  
**Přidělovaný titul** Bc.  
**Jazyk práce** Čeština  
**Datový formát elektronické verze** PDF

**Anotace práce** Podkladem pro výběr a srovnání zejména nových částí kolejového svršku jsou kromě teoretické analýzy, také statické a dynamické zkoušky prováděné v laboratorii i v terénu. Nutno podotknout, že teoretická analýza aplikací matematického modelování často vychází ze značně zidealizovaných předpokladů. Náplní bakalářské práce je experimentální analýza dynamických účinků vybraných konstrukcí pružného bezpodkladnicového upevnění kolejnic. Účinky vlakové dopravy byly simulovány na speciálně upravených vzorcích pomocí inerciálního budiče. Bylo provedeno také doplňkové měření dynamické odezvy konstrukcí na ráz vyvolaný modálním kladivem. Měření byla uskutečněna v prostorách laboratoří ÚPKO a ÚŽKS a v terénu.

**Anotace práce v anglickém jazyce** Coupled with theory analyses, various static and dynamic tests carrying out in laboratory or directly on site serve as a basis for selection and comparison of particular rail superstructure parts. It should be noted that the theoretical analysis of the application of mathematical modeling is often based on

highly idealized assumptions. The purpose of this bachelor thesis is the experimental analysis of dynamic effects of selected flexible fastening structures without baseplates. Forces induced by the passage of trains have been simulated on a specially prepared samples using inertial exciter. Additional measurements of the dynamic response of structures to shock induced by a modal hammer were also performed. Measurements were performed in the laboratory of ÚPKO and ÚŽKS and in situ.

**Klíčová slova** Kolejový rošt, kolejnice, pražec, kolejové lože, vibrace, tlumení, frekvenční analýza

**Klíčová slova v anglickém jazyce** Track grid, rail, sleeper, ballast layer, vibration, damping, frequency analysis

# **PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY VŠKP**

## **Prohlášení:**

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané práce je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 25.5.2012

.....  
podpis autora  
Adam Podolník